

# ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

Учебное пособие

Министерство образования и науки Российской Федерации

Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

# ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

Учебное пособие

*Рекомендовано методическим советом УрФУ  
для студентов, обучающихся по направлению  
140400 — Электроэнергетика и электротехника*

Екатеринбург  
Издательство Уральского университета  
2015

УДК 621.311:658.562(075.8)

ББК 31.277-7я73

Д44

Авторы: А. И. Хальясмаа, С. А. Дмитриев, С. Е. Кокин, Д. А. Глушков

Рецензенты: директор ООО «Единая инжиниринговая компания» *А. А. Костин*, канд. экон. наук, проф. *А. С. Семериков* (директор ОАО «Екатеринбургская электросетевая компания»)

Научный редактор — канд. техн. наук, доц. *А. А. Суворов*

**Д44      Диагностика электрооборудования электрических станций и подстан-**  
**ций : учебное пособие / А. И. Хальясмаа [и др.] . — Екатеринбург : Изд-**  
**во Урал. ун-та, 2015. — 64 с.**  
**ISBN 978-5-7996-1493-5**

В современных условиях высокого износа электросетевого оборудования оценка его технического состояния является обязательным и неотъемлемым требованием организации его надежной эксплуатации. Учебное пособие предназначено для изучения методов неразрушающего контроля и технического диагностирования в электроэнергетической области для оценки технического состояния электросетевого оборудования.

Библиогр.: 11 назв. Рис. 19. Табл. 4.

УДК 621.311:658.562(075.8)

ББК 31.277-7я73

ISBN 978-5-7996-1493-5

© Уральский федеральный университет, 2015

## **Введение**

---

На сегодняшний день экономическое состояние энергетики России вынуждает принимать меры по увеличению сроков эксплуатации различного электротехнического оборудования.

В России в настоящее время общая протяженность электрических сетей напряжением 0,4–110 кВ превышает 3 млн км, а трансформаторная мощность подстанций (ПС) и трансформаторных пунктов (ТП) — 520 млн кВА. Стоимость основных фондов сетей составляет около 200 млрд руб., а степень их износа — около 40 %. За 90-е годы резко сократились объемы строительства, технического перевооружения и реконструкции ПС [1], и только последние несколько лет вновь наметилась некоторая активность в этих направлениях.

Решение задачи по оценке технического состояния электротехнического оборудования электрических сетей в значительной мере связано с внедрением эффективных методов инструментального контроля и технической диагностики. Кроме того, оно необходимо и обязательно для безопасной и надежной работы электрооборудования.

# 1. Основные понятия и положения технической диагностики

.....

Экономическая ситуация, сложившаяся в последние годы в энергетике, заставляет принимать меры, направленные на увеличение сроков эксплуатации различного оборудования. Решение задачи по оценке технического состояния электротехнического оборудования электрических сетей в значительной мере связано с внедрением эффективных методов инструментального контроля и технической диагностики [2].

**Техническое диагностирование** (с греч. «распознавание») — это аппарат мероприятий, который позволяет изучать и устанавливать признаки неисправности (работоспособности) оборудования, устанавливать методы и средства, при помощи которых дается заключение (ставится диагноз) о наличии (отсутствии) неисправности (дефекта). Другими словами, техническая диагностика позволяет дать оценку состояния исследуемого объекта. Такая диагностика направлена в основном на поиск и анализ внутренних причин неисправности оборудования. Наружные причины определяются визуально [3].

Согласно ГОСТ 20911–89, техническая диагностика определяется как «область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объектов». Объект, состояние которого определяется, называется объектом диагностирования (ОД), а процесс исследования ОД — диагностированием.

Основной целью технической диагностики являются в первую очередь *распознавание состояния технической системы в условиях ограниченной информации, и как следствие, повышение надежности и оценка остаточного ресурса системы (оборудования)*. В связи с тем, что различные технические системы имеют различные структуры и назначения, нельзя ко всем системам применять один и тот же вид технической диагностики.

Условно структура технической диагностики для любого типа и назначения оборудования представлена на рис. 1. Она характеризуется двумя взаимопроникающими и взаимосвязанными направлениями: теорией распознавания и теорией контролеспособности. Теория распознавания изучает алгоритмы распознавания применительно к задачам диагностики, которые обычно могут рассматриваться как задачи классификации. Алгоритмы распознавания в технической диагностике частично основываются

на диагностических моделях, устанавливающих связь между состояниями технической системы и их отображениями в пространстве диагностических сигналов. Важной частью проблемы распознавания являются правила принятия решений.

Контролеспособностью называется свойство изделия обеспечивать достоверную оценку его технического состояния и раннее обнаружение неисправностей и отказов. Основной задачей теории контролеспособности является изучение средств и методов получения диагностической информации [4].

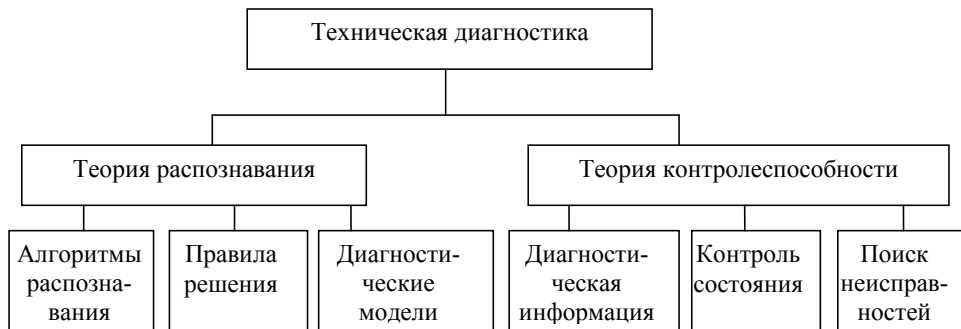


Рис. 1. Структура технической диагностики

Применение (выбор) вида технической диагностики определяется следующими условиями:

- 1) назначением контролируемого объекта (сфера использования, условия эксплуатации и т. д.);
- 2) сложностью контролируемого объекта (сложностью конструкции, количеством контролируемых параметров и т. д.);
- 3) экономической целесообразностью;
- 4) степенью опасности развития аварийной ситуации и последствий отказа контролируемого объекта.

Состояние системы описывается совокупностью определяющих ее параметров (признаков), при диагностировании системы они называются **диагностическими параметрами**. При выборе диагностических параметров приоритет отдается тем, которые удовлетворяют требованиям достоверности и избыточности информации о техническом состоянии системы в реальных условиях эксплуатации. На практике обычно используют несколько диагностических параметров одновременно. Диагностическими параметрами могут являться параметры рабочих процессов (мощность, напряжение, ток и др.), сопутствующих процессов (вибрация, шум, температура и др.) и геометрические величины (зазор, люфт, биение и др.). Количество измеряемых диагностических параметров также зависит от типов приборов

для диагностики системы (которыми производится сам процесс получения данных) и степени развитости методов диагностирования. Так, например, число измеряемых диагностических параметров силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов может достигать 38, масляных выключателей — 29, элегазовых выключателей — 25, ограничителей перенапряжения и разрядников — 10, разъединителей (с приводом) — 14, маслонаполненных измерительных трансформаторов и конденсаторов связи — 9 [5].

В свою очередь диагностические параметры должны обладать следующими свойствами:

- 1) чувствительностью;
- 2) шириной изменения;
- 3) однозначностью;
- 4) стабильностью;
- 5) информативностью;
- 6) периодичностью регистрации;
- 7) доступностью и удобством измерения.

**Чувствительность** диагностического параметра — это степень изменения диагностического параметра при варьировании функционального параметра, т. е. чем больше значение этой величины, тем чувствительнее диагностический параметр к изменению функционального параметра.

**Однозначность** диагностического параметра определяется монотонно возрастающей или убывающей зависимостью его от функционального параметра в диапазоне от начального до предельного изменения функционального параметра, т. е. каждому значению функционального параметра соответствует одно-единственное значение диагностического параметра, а, в свою очередь, каждому значению диагностического параметра соответствует одно-единственное значение функционального параметра.

**Стабильность** устанавливает возможную величину отклонения диагностического параметра от своего среднего значения при многократных измерениях в неизменных условиях.

**Ширина изменения** — диапазон изменения диагностического параметра, соответствующий заданной величине изменения функционального параметра; таким образом, чем больше диапазон изменения диагностического параметра, тем выше его информативность.

**Информативность** — это свойство диагностического параметра, которое при недостаточности или избыточности может снизить эффективность самого процесса диагностики (достоверность диагноза).

**Периодичность регистрации** диагностического параметра определяется, исходя из требований технической эксплуатации и инструкций завода-изготовителя, и зависит от скорости возможного образования и развития дефекта.

**Доступность и удобство измерения** диагностического параметра на прямую зависят от конструкции объекта диагностирования и диагностического средства (прибора).

В различной литературе можно найти разные классификации диагностических параметров, в нашем случае для диагностики электрооборудования мы будем придерживаться типов диагностических параметров, представленных в источнике [6].

Диагностические параметры подразделяются на три типа:

1. Параметры информационного вида, представляющие объектную характеристику;
2. Параметры, представляющие текущую техническую характеристику элементов (узлов) объекта;
3. Параметры, представляющие собой производные нескольких параметров.

К диагностическим параметрам информационного вида относятся:

1. Тип объекта;
2. Время ввода в эксплуатацию и период эксплуатации;
3. Ремонтные работы, проводимые на объекте;
4. Технические характеристики объекта, полученные при испытании на заводе-изготовителе и/или при вводе в эксплуатацию.

Диагностическими параметрами, представляющими текущую техническую характеристику элементов (узлов) объекта, чаще всего являются параметры рабочих (иногда сопутствующих) процессов.

К диагностическим параметрам, представляющим собой производные нескольких параметров, относятся, прежде всего, такие как:

1. Максимальная температура наиболее нагретой точки трансформатора при любой нагрузке;
2. Динамические характеристики или их производные.

Во многом выбор диагностических параметров зависит от каждого конкретного типа оборудования и метода диагностирования, используемого для этого оборудования.



## 2. Концепция и результаты диагностики

.....

Современную диагностику электрооборудования (по назначению) условно можно разделить на три основных направления:

1. Параметрическая диагностика;
2. Диагностика неисправностей;
3. Превентивная диагностика.

**Параметрическая диагностика** — это контроль нормируемых параметров оборудования, обнаружение и идентификация их опасных изменений. Используется она для аварийной защиты и управления оборудованием, а диагностическая информация содержится в совокупности отклонений величин этих параметров от номинальных значений.

**Диагностика неисправностей** — это определение вида и величины дефекта после регистрации факта появления неисправности. Такая диагностика является частью работ по обслуживанию или ремонту оборудования и выполняется по результатам контроля его параметров.

**Превентивная диагностика** — это обнаружение всех потенциально опасных дефектов на ранней стадии развития, наблюдение за их развитием и на этой основе долгосрочный прогноз состояния оборудования [7].

Современные системы диагностирования включают в себя все три направления технической диагностики, чтобы сформировать наиболее полную и достоверную оценку состояния оборудования.

Таким образом, к **результатам диагностики** можно отнести:

1. Определение состояния диагностируемого оборудования (оценка состояния оборудования);
2. Выявление вида дефекта, его масштабы, место расположения, причин появления, что служит основой для принятия решения о последующей эксплуатации оборудования (выводе в ремонт, дополнительном обследовании, продолжении эксплуатации и т. п.) или о полной замене оборудования;
3. Прогноз о сроках последующей эксплуатации — оценка остаточного ресурса работы электрооборудования.

Следовательно, можно сделать вывод, что для *предупреждения образования дефектов (или выявления на ранних стадиях образования) и поддержания эксплуатационной надежности оборудования необходимо применять контроль оборудования в виде системы диагностики.*

По общей классификации, все методы диагностирования электрооборудования можно разделить на две группы, также называемые методами контроля: методы неразрушающего и разрушающего контроля. Методы неразрушающего контроля (МНК) — методы контроля материалов (изделий), не требующие разрушения образцов материала (изделия). Соответственно, методы разрушающего контроля — методы контроля материалов (изделий), требующие разрушения образцов материала (изделия).

Все МНК в свою очередь также подразделяются на методы, но уже в зависимости от принципа работы (физических явлений, на которых они основаны). Ниже представлены основные МНК, согласно ГОСТ 18353–79, наиболее часто применяемые для электротехнического оборудования:

- 1) магнитный,
- 2) электрический,
- 3) вихретоковый,
- 4) радиоволновой,
- 5) тепловой,
- 6) оптический,
- 7) радиационный,
- 8) акустический,
- 9) проникающими веществами (капиллярный и течеискания).

Внутри каждого вида методы также классифицируют по дополнительным признакам.

Дадим каждому методу МНК четкие определения, используемые в нормативной документации.

**Магнитные методы контроля**, согласно ГОСТ 24450–80, основаны на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами, или на определении магнитных свойств контролируемых изделий.

**Электрические методы контроля**, согласно ГОСТ 25315–82, основаны на регистрации параметров электрического поля, взаимодействующего с контрольным объектом, или поля, возникающего в контрольном объекте в результате внешнего воздействия.

По ГОСТ 24289–80, **вихретоковый метод контроля** основан на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых возбуждающей катушкой в электропроводящем объекте контроля этим полем.

**Радиоволновой метод контроля** — метод неразрушающего контроля, основанный на анализе взаимодействия электромагнитного излучения радиоволнового диапазона с объектом контроля (ГОСТ 25313–82).

**Тепловые методы контроля**, согласно ГОСТ 53689–2009, основаны на регистрации тепловых или температурных полей объекта контроля.

**Визуально-оптические методы контроля**, согласно ГОСТ 24521–80, основаны на взаимодействии оптического излучения с объектом контроля.

**Радиационные методы контроля** основаны на регистрации и анализе проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия с контролируемым объектом (ГОСТ 18353–79).

**Акустические методы контроля** основаны на применении упругих колебаний, возбуждаемых или возникающих в объекте контроля (ГОСТ 23829–85).

**Капиллярные методы контроля**, согласно ГОСТ 24521–80, основаны на капиллярном проникновении индикаторных жидкостей в полости поверхностных и сквозных несплошностей материала объектов контроля и регистрации образующихся индикаторных следов визуальным способом или с помощью преобразователя.

### 3. Дефекты электрооборудования

---

Оценка технического состояния электрооборудования является важнейшим элементом всех основных аспектов эксплуатации электростанций и подстанций [8]. Одной из ее основных задач является выявление факта исправности или неисправности оборудования.

Принято считать исправным оборудование, состояние которого соответствует всем установленным нормативными документами требованиям, в противном случае — неисправным.

Переход изделия из исправного состояния в неисправное происходит вследствие дефектов. Слово *дефект* употребляется для обозначения каждого отдельного несоответствия оборудования.

Дефекты в оборудовании могут возникать в разные моменты его жизненного цикла: при изготовлении, монтаже, настройке, эксплуатации, испытаниях, ремонте — и иметь различные последствия [9].

Видов дефектов, точнее их разновидностей, электротехнического оборудования много. Так как знакомство с видами диагностики электрооборудования в пособии начнется с тепловизионной диагностики, то будем пользоваться градацией состояния дефектов (оборудования), чаще применимой при ИК-контроле. Обычно выделяют четыре основные категории или степени развития дефекта:

1. Нормальное состояние оборудования (дефекты отсутствуют);
2. Дефект в начальной стадии развития (наличие такого дефекта не оказывает явного влияния на работу оборудования);
3. Сильно развитый дефект (наличие такого дефекта ограничивает возможность эксплуатации оборудования или сокращает его жизненный срок);
4. Дефект в аварийной стадии развития (наличие такого дефекта делает эксплуатацию оборудования невозможной или недопустимой).

Как следствие выявления таких дефектов, в зависимости от степени их развития, принимаются следующие возможные решения (мероприятия) по их устранению:

1. Заменить оборудование, его часть или элемент;
2. Выполнить ремонт оборудования или его элемента (после этого провести дополнительное обследование для оценки качества выполненного ремонта);
3. Оставить в эксплуатации, но уменьшить время между периодическими обследованиями (учащенный контроль);
4. Провести другие дополнительные испытания.

При выявлении дефектов и принятии решений по дальнейшей эксплуатации электротехнического оборудования не стоит забывать и о вопросе достоверности и точности полученной информации о состоянии оборудования.

Любой метод НК не обеспечивает полной достоверности оценки состояния объекта. Результаты измерений включают в себя ошибки, поэтому всегда существует вероятность получения ложного результата контроля:

- исправный объект будет признан негодным (ложный дефект или ошибка первого рода);
- неисправный объект будет признан годным (обнаруженный дефект или ошибка второго рода).

Ошибки при НК приводят к различным последствиям: если ошибки первого рода (ложный дефект) только увеличивают объем восстановительных работ, то ошибки второго рода (необнаруженный дефект) влекут за собой аварийное повреждение оборудования [10].

Стоит заметить, что при любом виде НК можно выделить ряд факторов, влияющих на результаты измерений или анализ полученных данных. Условно можно разделить эти факторы на три основные группы:

1. Окружающая среда;
2. Человеческий фактор;
3. Технический аспект.

К группе «окружающая среда» можно отнести такие факторы, как метеословия (температура воздуха, влажность, облачность, сила ветра и т. д.), время суток.

Под «человеческим фактором» понимают квалификацию персонала, профессиональное знание оборудования и грамотное проведение непосредственно самого тепловизионного контроля.

«Технический аспект» подразумевает под собой информационную базу о диагностируемом оборудовании (материал, паспортные данные, год выпуска, состояние поверхности и т. д.).

На самом деле факторов, влияющих на результат методов НК и анализ данных методов НК, гораздо больше, чем перечислено выше. Но эта тема представляет отдельный интерес и так обширна, что достойна выделения в отдельную книгу.

Именно по причине возможности допущения ошибок по каждому виду НК существует своя нормативная документация, регламентирующая назначение методов НК, процедуру проведения НК, средства НК, анализ результатов НК, возможные виды дефектов при НК, рекомендации по их устранению и т. д.

Далее в пособии будут рассмотрены основные методы НК для электротехнического оборудования согласно классификации ГОСТ 18353–79. Ниже в таблице представлены основные нормативные документы, которыми необходимо руководствоваться при проведении диагностики с помощью основных методов неразрушающего контроля.

Таблица 1

**Нормативная документация**

Метод НК	Нормативная документация
Магнитный	ГОСТ 24450–80. Контроль неразрушающий магнитный. Термины и определения
	ГОСТ 21105–87. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод
	ГОСТ 30415–96. Сталь. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры труб. Магнитный метод
	ГОСТ Р 52005–2003. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Общие требования
Электрический	ГОСТ 25315–82. Контроль неразрушающий электрический. Термины и определения
Вихретоковый	ГОСТ 24289–80. Контроль неразрушающий вихретоковый. Термины и определения
Радиоволновой	ГОСТ 23480–79. Контроль неразрушающий. Методы радиоволнового вида. Общие требования
Тепловой	ГОСТ 25314–82. Контроль неразрушающий тепловой. Термины и определения
	ГОСТ 25314–82. Контроль неразрушающий. Методы теплового вида. Общие требования
	Объем и нормы испытаний электрооборудования. РД 34.45–51.300–97. РАО «ЕЭС России». М.: ЭНАС, 1998
	Основные положения метода ИК диагностики электрооборудования и высоковольтных линий. РД 153-34.0-20.363-99
Оптический	ГОСТ 23479–79. Контроль неразрушающий. Методы оптического вида. Общие требования
Радиационный	ГОСТ 20426–82. Контроль неразрушающий. Методы радиационные. Общие требования
	ГОСТ 24034–80. Контроль неразрушающий. радиационный. Термины и определения
Акустический	ГОСТ 20415–82. Контроль неразрушающий. Методы акустические. Общие положения
Проникающими веществами (капиллярный и течеискания)	ГОСТ 18442–80. Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования
	ГОСТ 24522–80. Контроль неразрушающий капиллярный. Термины и определения
	ГОСТ 26182–84. Контроль неразрушающий. Люминесцентный метод течеискания
	ГОСТ 28517–90. Контроль неразрушающий. Масс-спектрометрический метод течеискания

## **4. Тепловые методы контроля**

---

### **4.1. Тепловые методы контроля: основные термины и назначение**

---

Тепловые методы контроля (ТМК) основаны на измерении, оценке и анализе температуры контролируемых объектов. Главным условием применения диагностики с помощью тепловых МНК является наличие в диагностируемом объекте тепловых потоков.

Температура — самое универсальное отражение состояния любого оборудования. При практически любом, отличном от нормального режиме работы оборудования изменение температуры является самым первым показателем, указывающим на неисправное состояние. Температурные реакции при разных режимах работы в силу своей универсальности возникают на всех этапах эксплуатации электротехнического оборудования [11].

Инфракрасная диагностика является наиболее перспективным и эффективным направлением развития в диагностике электрооборудования. Она обладает рядом достоинств и преимуществ по сравнению с традиционными методами испытаний, а именно:

- 1) достоверность, объективность и точность получаемых сведений;
- 2) безопасность персонала при проведении обследования оборудования;
- 3) отсутствие необходимости отключения оборудования;
- 4) отсутствие необходимости подготовки рабочего места;
- 5) большой объем выполняемых работ за единицу времени;
- 6) возможность определения дефектов на ранней стадии развития;
- 7) диагностика большинства типов подстанционного электрооборудования;
- 8) малые трудозатраты на производство измерений на единицу оборудования.

Применение ТМК основано на том, что наличие практически всех видов дефектов оборудования вызывает изменение температуры дефектных элементов и, как следствие, изменение интенсивности инфракрасного

(ИК) излучения, которое может быть зарегистрировано тепловизионными приборами [12].

ТМК для диагностики электротехнического оборудования на электрических станциях и подстанциях может использоваться для следующих видов оборудования:

- 1) силовых трансформаторов и их высоковольтных вводов;
- 2) коммутационного оборудования: силовых выключателей, разъединителей;
- 3) измерительных трансформаторов: трансформаторов тока (ТТ) и напряжения (ТН);
- 4) разрядников и ограничителей перенапряжения (ОПН);
- 5) ошиновки распределительных устройств (РУ);
- 6) изоляторов;
- 7) контактных соединений;
- 8) генераторов (лобовых частей и активной стали);
- 9) линий электропередачи (ЛЭП) и их конструктивных элементов (например, опоры ЛЭП) и т. д.

ТМК для высоковольтного оборудования как один из современных методов исследования и контроля был введен в «Объем и нормы испытаний электрооборудования РД 34.45–51.300–97» в 1998 году, хотя во многих энергосистемах применялся намного раньше [13].

## 4.2. Основные приборы для обследования оборудования ТМК

Для проведения обследования электрооборудования ТМК используется тепловизионный измерительный прибор (тепловизор). Согласно ГОСТ Р 8.619–2006, *тепловизор* — оптико-электронный прибор, предназначенный для бесконтактного (дистанционного) наблюдения, измерения и регистрации пространственного / пространственно-временного распределения радиационной температуры объектов, находящихся в поле зрения прибора, путем формирования временной последовательности термограмм и определения температуры поверхности объекта по известным коэффициентам излучения и параметрам съемки (температура окружающей среды, пропускание атмосферы, дистанция наблюдения и т. п.). Иначе говоря, тепловизор — это своего рода телекамера, снимающая объекты в ИК-излучении, позволяющая в реальном времени получить картину распределения теплоты (разницы температур) на поверхности.

Тепловизоры бывают различных модификаций, но принцип работы и конструкции у них примерно одинаковы. Ниже, на рис. 2 представлен внешний вид различных тепловизоров.





Рис. 2. Внешний вид тепловизора:

*а* — профессиональный тепловизор; *б* — стационарный тепловизор для систем непрерывного контроля и мониторинга; *в* — простейший компактный переносной тепловизор

Диапазон измеряемых температур, в зависимости от марки и типа тепловизора, может быть от  $-40$  до  $+2000$  °С.

Принцип работы тепловизора основан том, что все физические тела нагреты неравномерно, вследствие чего складывается картина распределения ИК-излучения. Другими словами, действие всех тепловизоров основано на фиксировании температурной разницы «объект/фон» и на преобразовании полученной информации в изображение (термограмму), видимое глазом [14]. Термограмма, согласно ГОСТ Р 8.619–2006, — это многоэлементное двухмерное изображение, каждому элементу которого приписывается цвет / или градация одного цвета / градация яркости экрана, определяемые в соответствии с условной температурной шкалой. То есть температурные поля объектов рассматриваются в виде цветового изображения, где градации цвета соответствуют градации температур. На рис. 3 представлен пример.



Рис. 3. Опорные изоляторы:

*а* — фотография, *б* — термограмма

Все цвета на термограммах достаточно условны и не соответствуют реальным цветам. ИК-термограммы визуализируются в одной из цветовых

палитр. Связь палитры цветов с температурой на термограмме задается самим оператором, т. е. тепловые изображения являются псевдоцветовыми.

Выбор цветовой палитры термограммы зависит от диапазона используемых температур. Изменение цветовой палитры применяют для увеличения контраста и эффективности визуального восприятия (информативности) термограммы. Число и виды палитр зависят от производителя тепловизора. Приведем основные, наиболее часто используемые палитры для термограмм:

1. RGB (red — красный, green — зеленый, blue — синий);
2. Hot metal (цвета каления металла);
3. Hot blue;
4. Gray (серый);
5. Infratec;
6. Agema;
7. Inframetrics;
8. CMY (cyan — бирюзовый, magenta — пурпурный, yellow — желтый).

На рис. 4 представлена термограмма предохранителей, на примере которой можно рассмотреть основные составляющие (элементы) термограммы:

1. Температурная шкала — определяет соотношение между цветовой гаммой участка термограммы и его температурой;
2. Зона аномального нагрева (характеризуется цветовой гаммой из верхней части температурной шкалы) — элемент оборудования, имеющий повышенную температуру;
3. Линия температурного среза (профиль) — линия, проходящая через зону аномального нагрева и узел, аналогичный дефектному;
4. Температурный график — график, отображающий распределение температуры вдоль линии температурного среза, т. е. по оси X — порядковые номера точек по длине линии, а по оси Y — значения температуры в этих точках термограммы.

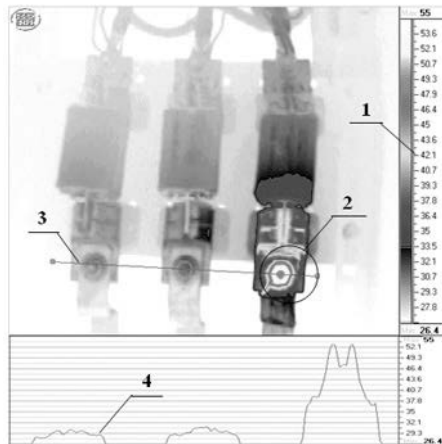


Рис. 4. Термограмма предохранителей

В данном случае термограмма представляет собой слияние теплового и реального изображения, что предусматривается не во всех программных продуктах для анализа данных тепловизионной диагностики. Также стоит заметить, что температурный график и линия температурного среза являются элементами анализа данных термограммы и без помощи программного обеспечения для обработки теплового изображения воспользоваться ими невозможно.

Стоит подчеркнуть, что распределение цветов на термограмме выбрано произвольно и в данном примере делит дефекты на три группы: зеленую, желтую, красную. Красная группа объединяет серьезные дефекты, в зеленую группу попадают зарождающиеся дефекты.

Также для бесконтактного измерения температуры используют пирометры, принцип действия которых основан на измерении мощности теплового излучения объекта измерения преимущественно в инфракрасном диапазоне [16].

На рис. 5 представлен внешний вид различных пирометров.



Рис. 5. Внешний вид пирометра

Диапазон измеряемых температур, в зависимости от марки и типа пирометра, может быть от  $-100$  до  $+3000$  °C.

Принципиальное отличие тепловизоров от пирометров заключается в том, что пирометры измеряют температуру в конкретной точке (до 1 см), а тепловизоры анализируют весь объект целиком, показывая всю разность и колебания температур в любой его точке.

При анализе результатов ИК-диагностики необходимо учитывать конструкции диагностируемого оборудования, способы, условия и продолжительность эксплуатации, технологию изготовления и ряд других факторов.

В табл. 2 рассмотрены основные виды электрооборудования на подстанциях и типы дефектов, выявляемые с помощью ИК-диагностики согласно источнику [16].

Таблица 2

**Виды дефектов оборудования на подстанциях, выявляемых  
с помощью ИК-диагностики**

Оборудование электростанций и сетей	Выявляемые неисправности
Генераторы	Межлистовые замыкания статора. Ухудшение паек обмоток. Оценка теплового состояния щеточного аппарата. Нарушение работы систем охлаждения статоров. Проверка элементов системы возбуждения
Трансформаторы	Очаги возникновения магнитных полей рассеивания. Образование застойных зон в баках трансформаторов за счет шламообразования, разбухания или смещения изоляции обмоток, неисправности маслосистемы. Дефекты вводов. Оценка эффективности работы систем охлаждения
Коммутационная аппаратура	Перегрев контактов токоведущих шин, рабочих и дугогасительных камер. Состояние внутрибаковой изоляции. Дефекты вводов, делительных конденсаторов. Трещины опоростержневых изоляторов
Маслонаполненные трансформаторы тока	Перегревы наружных и внутренних контактных соединений. Ухудшение состояния внутренней изоляции обмоток
Вентильные разрядники и ограничители перенапряжений	Нарушение герметизации элементов. Обрыв шунтирующих сопротивлений. Неправильная комплектация элементов
Конденсаторы	Пробой секций элементов
Линейные ВЧ заградители	Перегревы контактных соединений
КРУ, КРУН, токопроводы	Перегревы контактных соединений выключателей, разъединителей, трансформаторов тока, кабелей, токоведущих шин и т. п.
Кабельное хозяйство электростанций	Перегревы силовых кабелей, оценка пожароопасности кабелей

В настоящее время тепловизионный контроль электрооборудования и воздушных линий электропередачи предусмотрен РД 34.45–51.300–97 «Объем и нормы испытаний электрооборудования».

## 5. Диагностика маслонаполненного оборудования

---

Сегодня на подстанциях используется достаточное количество маслонаполненного оборудования. Маслонаполненное оборудование — это такое оборудование, в котором в качестве дугогасительной, изолирующей и охлаждающей среды используется масло.

На сегодняшний день на подстанциях применяют и эксплуатируют маслонаполненное оборудование следующих видов:

- 1) силовые трансформаторы;
- 2) измерительные трансформаторы тока и напряжения;
- 3) шунтирующие реакторы;
- 4) выключатели;
- 5) высоковольтные вводы;
- 6) маслонаполненные кабельные линии.

Стоит подчеркнуть, что немалая доля маслонаполненного оборудования, эксплуатируемого сегодня, используется на пределе своих возможностей — свыше своего нормативного срока эксплуатации. И наряду с другими частями оборудования масло также подвергнуто старению.

Состоянию масла уделяется особое внимание, так как под воздействием электрических и магнитных полей происходит изменение его первоначального молекулярного состава, а также, вследствие эксплуатации, возможно изменение его объема. Что в свою очередь может представлять опасность как для работы оборудования на подстанции, так и для обслуживающего персонала.

Поэтому правильная и своевременная диагностика масла — залог надежной работы маслонаполненного оборудования.

Масло — очищенная фракция нефти, получаемая при перегонке, кипящая при температуре от 300 до 400 °С. В зависимости от происхождения нефти оно обладает различными свойствами, и эти отличительные свойства исходного сырья и способов получения отражаются на свойствах масла. Масло в энергетической области считается наиболее распространенным жидким диэлектриком [17].

Кроме нефтяных трансформаторных масел возможно изготовление синтетических жидких диэлектриков на основе хлорированных углеводородов и кремнийорганических жидкостей [18].

К основным типам масла российского производства, наиболее часто используемым для маслонеполненного оборудования, можно отнести следующие: ТКп (ТУ 38.101890–81), Т-1500У (ТУ 38.401–58–107–97), ТСО (ГОСТ 10121–76), ГК (ТУ 38.1011025–85), ВГ (ТУ 38.401978–98), АГК (ТУ 38.1011271–89), МВТ (ТУ 38.401927–92).

Таким образом, анализ масла проводится для определения не только показателей качества масла, которые должны соответствовать требованиям нормативно-технической документации. Состояние масла характеризуется его показателями качества. Основные показатели качества трансформаторного масла приведены в п. 1.8.36 ПУЭ.

В табл. 3 приведены наиболее часто используемые на сегодняшний день показатели качества трансформаторного масла.

Таблица 3

**Показатели качества трансформаторного масла**

Показатель качества масла и номер стандарта на метод испытания	Выявляемые неисправности
Электрическая прочность	Межлистовые замыкания статора
Кислотное число	Очаги возникновения магнитных полей рассеивания. Оценка эффективности работы систем охлаждения
Содержание водорастворимых кислот	Перегрев контактов токоведущих шин, рабочих и дугогасительных камер. Состояние внутрибаковой изоляции
Температура вспышки в закрытом тигле	Перегревы наружных и внутренних контактных соединений. Ухудшение состояния внутренней изоляции обмоток
Наличие механических примесей	Нарушение герметизации элементов. Обрыв шунтирующих сопротивлений
Цвет масла	Пробой секций элементов
Тангенс угла диэлектрических потерь масла	Перегревы контактных соединений
Общее газосодержание масла	Перегревы контактных соединений выключателей, разъединителей, трансформаторов тока, кабелей, токоведущих шин и т. п.
Наличие растворенного шлама	Перегревы силовых кабелей, оценка пожароопасности кабелей

*В масле содержится около 70 % информации о состоянии оборудования.*

Минеральное масло — сложная многокомпонентная смесь углеводородов ароматического, нафтенового и парафинового рядов, а также относительно количества кислородных, сернистых и азотосодержащих производных этих углеводородов.

**1. Ароматические ряды** отвечают за стабильность против окисления, термическую устойчивость, вязкостно-температурные и электроизоляционные свойства.

**2. Нафтеновые ряды** отвечают за температуру кипения, вязкость и плотность масла.

**3. Парафиновые ряды.**

Химический состав масел обусловлен свойствами исходного нефтяного сырья и технологией производства.

В среднем для маслonaполненного оборудования периодичность обследования и объем испытаний оборудования составляют 1 раз в два (в четыре) года.

**Электрическая прочность**, характеризующая пробивным напряжением в стандартном разряднике или соответствующей напряженностью электрического поля, меняется при увлажнении и загрязнении масла и поэтому может служить диагностическим признаком. При снижении температуры избыток воды выделяется в виде эмульсии, которая вызывает снижение пробивного напряжения, особенно при наличии загрязнений.

Информацию о наличии **увлажнения масла** может также дать его  $\text{tg } \delta$ , однако лишь при больших количествах влаги. Это можно объяснить малым влиянием на  $\text{tg } \delta$  масла растворенной в нем воды; резкий рост  $\text{tg } \delta$  масла происходит при возникновении эмульсии.

В изоляционных конструкциях основной объем влаги находится в твердой изоляции. Между ней и маслом, а в негерметизированных конструкциях еще и между маслом и воздухом, постоянно происходит влагообмен. При стабильном температурном режиме наступает равновесное состояние, и тогда по влагосодержанию масла можно оценить влагосодержание твердой изоляции.

Под влиянием электрического поля, температуры и окислителей масло начинает окисляться с образованием кислот и сложных эфиров, на более поздней стадии старения — с образованием шлама.

Последующее отложение шлама на бумажной изоляции не только ухудшает охлаждение, но и может привести к пробое изоляции, поскольку шлам никогда не отлагается равномерно.

**Диэлектрические потери** в масле определяются в основном его проводимостью и растут по мере накопления в масле продуктов старения и загрязнений. Начальные значения  $\operatorname{tg} \delta$  свежего масла зависят от его состава и степени очистки. Зависимость  $\operatorname{tg} \delta$  от температуры — логарифмическая.

**Старение масла** определяется окислительными процессами, воздействием электрического поля и присутствием конструкционных материалов (металлы, лаки, целлюлоза). В результате старения ухудшаются изоляционные характеристики масла и выпадает осадок, который затрудняет теплообмен и ускоряет старение целлюлозной изоляции. Значительную роль в ускорении старения масла играют повышенная рабочая температура и наличие кислорода (в негерметизированных конструкциях).

Необходимость контроля за изменением состава масла в процессе эксплуатации трансформаторов ставит вопрос о выборе такого аналитического метода, который смог бы обеспечить надежное качественное и количественное определение содержащихся в трансформаторном масле соединений. В наибольшей степени этим требованиям отвечает хроматография, представляющая собой комплексный метод, объединивший стадию разделения сложных смесей на отдельные компоненты и стадию их количественного определения. По результатам этих анализов проводится оценка состояния маслonaполненного оборудования.

Испытания изоляционного масла проводятся в лабораториях, для чего у оборудования отбираются пробы масла.

Методы определения их основных характеристик, как правило, регламентируются государственными стандартами.

Хроматографический анализ газов, растворенных в масле, позволяет выявить дефекты, например, трансформатора на ранней стадии их развития, предполагаемый характер дефекта и степень имеющегося повреждения. Состояние трансформатора оценивается сопоставлением полученных при анализе количественных данных с граничными значениями концентрации газов и по скорости роста концентрации газов в масле. Этот анализ для трансформаторов напряжением 110 кВ и выше должен осуществляться не реже 1 раза в 6 месяцев.

*Хроматографический анализ трансформаторных масел включает:*

- 1) определение содержания растворенных в масле газов;
- 2) определение содержания антиокислительной присадки — ионов и др.;
- 3) определение влагосодержания;
- 4) определение содержания азота и кислорода и т. д.

По результатам этих анализов проводится оценка состояния маслonaполненного оборудования.

Определение электрической прочности масла (ГОСТ 6581—75) проводится в специальном сосуде с нормированными размерами электродов при приложении напряжения промышленной частоты.



Диэлектрические потери в масле измеряются мостовой схемой при напряженности переменного электрического поля, равной 1 кВ/мм (ГОСТ 6581–75). Измерение производится при помещении пробы в специальную трехэлектродную (экранированную) измерительную ячейку (сосуд). Значение  $\tan \delta$  определяется при температурах 20 и 90 °С (для некоторых масел при 70 °С). Обычно сосуд помещают в термостат, однако это значительно увеличивает время, затрачиваемое на испытания. Более удобен сосуд со встроенным нагревателем.

Количественная оценка содержания механических примесей производится путем фильтрования пробы с последующим взвешиванием осадка (ГОСТ 6370–83).

Применяют два метода определения количества воды, растворенной в масле. Метод, регламентированный ГОСТ 7822–75, основан на взаимодействии гидрида кальция с растворенной водой. Массовая доля воды определяется по объему выделившегося водорода. Этот метод сложен; результаты не всегда воспроизводимы. Предпочтительней кулонометрический метод (ГОСТ 24614–81), основанный на реакции между водой и реактивом Фишера. Реакция идет при прохождении тока между электродами в специальном аппарате. Чувствительность метода —  $2 \cdot 10^{-6}$  (по массе).

Кислотное число измеряется количеством гидроокисеткалия (в миллиграммах), затраченного для нейтрализации кислых соединений, извлеченных из масла раствором этилового спирта (ГОСТ 5985–79).

Температурой вспышки называется самая низкая температура масла, при которой в условиях испытаний образуется смесь паров и газов с воздухом, способная вспыхивать от открытого пламени (ГОСТ 6356–75). Нагревание масла производится в закрытом тигле с перемешиванием; испытание смеси — через определенные интервалы времени.

Малый внутренний объем (вводов) оборудования при значении даже незначительного повреждения способствует быстрому росту концентрации сопровождающих их газов.

В этом случае появление газов в масле жестко связано с нарушением целостности изоляции вводов.

Общее газосодержание масла определяют путем извлечения газа из пробы масла, помещенной в вакуумированный сосуд. Более удобный и точный метод — хроматографический (с вакуумным выделением газа). При этом дополнительно могут быть получены данные о содержании кислорода, который определяет окислительные процессы в масле.

К типичным газам, образующимся из минерального масла и целлюлозы (бумаги и картона) в трансформаторах, относятся:

- водород ( $H_2$ );
- метан ( $CH_4$ );
- этан ( $C_2H_6$ );

- этилен ( $C_2H_4$ );
- ацетилен ( $C_2H_2$ );
- угарный газ (CO);
- углекислый газ ( $CO_2$ ).

Дополнительно всегда присутствуют кислород и азот, а их концентрация изменяется в зависимости от герметичности корпуса трансформатора.

Кроме того, также могут выделяться такие газы, как пропан, бутан, бутен и другие, но их исследование в диагностических целях не получило широкого распространения.

Концентрация различных газов предоставляет информацию о типе зарождающейся неисправности, а также о серьезности повреждения, как представлено в табл. 4.

Таблица 4

**Характер развивающихся дефектов по отношению концентраций пар газов**

№ п/п	Характер прогнозируемого дефекта	Отношение концентраций характерных газов			Типичные примеры
		$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	
1.	Нормально	$<0,1$	$0,1-1$	$\leq 1$	Нормальное старение
2.	Частичные разряды с низкой плотностью энергии	$<0,1$	$<0,1$	$\leq 1$	Разряды в заполненных газом полостях, образовавшихся вследствие неполной пропитки или влажности изоляции
3.	Частичные разряды с высокой плотностью энергии	$0,1-3$	$<0,1$	$\leq 1$	То же, что и в п. 2, но ведет к оставлению следа или пробой твердой изоляции
4.	Разряды малой мощности	$>0,1$	$0,1-1$	$1-3$	Непрерывное искрение в масле между соединениями различных потенциалов или плавающего потенциала. Пробой масла между твердыми материалами
5.	Разряды большой мощности	$0,1-3$	$0,1-1$	$\geq 3$	Дуговые разряды; искрение; пробой масла между обмотками или катушками или между катушками на землю
6.	Термический дефект низкой температуры ( $<150^\circ C$ )	$<0,1$	$0,1-1$	$1-3$	Перегрев изолированного проводника

Окончание табл. 4

№ п/п	Характер прогнозируемого дефекта	Отношение концен- траций характерных газов			Типичные примеры
		$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	
7.	Термический дефект в диапазоне низких температур (150–300 °С)	<0,1	$\geq 1$	<1	Местный перегрев сердечника из-за концентрации потока. Возрастание температуры «горячей точки»
8.	Термический дефект в диапазоне средних температур (300–700 °С)	<0,1	$\geq 1$	1–3	То же, что и в п. 7, но при дальнейшем повышении температуры «горячей точки»
9.	Термический дефект высокой температуры (>700 °С)	<0,1	$\geq 1$	$\geq 3$	Горячая точка в сердечнике; перегрев меди из-за вихревых токов, плохих контактов; циркулирующие токи в сердечнике или баке

*Примеры основного оборудования для анализа состава масла:*

1. Влагомер — предназначен для измерения массовой доли влаги в трансформаторном масле.



Рис. 6. Влагомер

2. Измеритель объемной доли газов — предназначен для измерений объемной доли газов, растворенных в трансформаторном масле.



Рис.7. Измеритель объемной доли газов

3. Измеритель диэлектрических параметров трансформаторного масла — предназначен для измерений относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь трансформаторного масла.



Рис. 8. Измеритель диэлектрических параметров масла

4. Автоматический тестер трансформаторного масла — используется для измерения электрической прочности электроизоляционных жидкостей на пробой. Напряжение пробоя отражает степень загрязненности жидкости различными примесями.



Рис. 9. Тестер трансформаторного масла

5. Система мониторинга параметров трансформатора: мониторинг содержания газов и влаги в трансформаторном масле — контроль на работающем трансформаторе осуществляется непрерывно, запись данных осуществляется с заданной периодичностью во внутреннюю память или отсылается диспетчеру.



Рис. 10. Система мониторинга параметров трансформатора

6. Диагностика изоляции трансформаторов: определение старения или содержания влаги в изоляции трансформаторов.



Рис. 11. Диагностика изоляции трансформаторов

7. Автоматический измеритель влагосодержания — позволяет определять содержание воды в микрограммовом диапазоне.



Рис. 12. Автоматический измеритель влагосодержания

## 6. Электрические методы неразрушающего контроля

---

В настоящее время в России отмечен всплеск интереса к диагностическим системам, позволяющим проводить диагностику электрооборудования неразрушающими методами контроля. ОАО «ФСК ЕЭС» в «Положении о технической политике ОАО «ФСК ЕЭС» в распределительном электросетевом комплексе» четко сформулировало общую тенденцию развития в данном вопросе: «В кабельных сетях следует перейти от разрушающих методов испытаний (высоковольтные испытания выпрямленным постоянным напряжением) на неразрушающие методы диагностики состояния кабеля с прогнозированием состояния изоляции кабеля» (НРЭ № 11, 2006 г., п.2.6.6.).

Электрические методы основаны на создании в контролируемом объекте электрического поля либо непосредственным воздействием на него электрическим возмущением (например, полем постоянного или переменного тока), либо косвенно, с помощью воздействия возмущениями неэлектрической природы (например, тепловым, механическим и др.). В качестве первичного информативного параметра используются электрические характеристики объекта контроля [17].

К условно электрическому методу неразрушающего контроля для диагностирования электрооборудования можно отнести метод измерения частичных разрядов (ЧР). Внешними проявлениями процессов развития ЧР являются электрические и акустические явления, выделение газов, свечение, нагрев изоляции. Именно поэтому существует множество методов определения ЧР. На сегодняшний день для обнаружения частичных разрядов в основном используются три метода: электрический, электромагнитный и акустический.

Согласно ГОСТ 20074–83, ЧР называется локальный электрический разряд, который шунтирует только часть изоляции в электроизоляционной системе.

Другими словами, ЧР является результатом возникновения локальных концентраций электрической напряженности поля в изоляции или на ее поверхности, превышающей электрическую прочность изоляции в отдельных местах [18].

Для чего и почему измеряют ЧР в изоляции? Как известно, одним из основных требований, предъявляемых к электротехническому оборудованию, является безопасность его эксплуатации — исключение возможности контакта человека с токоведущими частями или их тщательное изоли-

рование. Именно поэтому надежность изоляции является одним из обязательных требований при эксплуатации электрооборудования.

В процессе эксплуатации изоляция высоковольтных конструкций подвергается длительному воздействию рабочего напряжения и многократному воздействию внутренних и атмосферных перенапряжений. Наряду с этим изоляция подвергается температурным и механическим воздействиям, вибрациям, а в ряде случаев и увлажнению, приводящим к ухудшению ее электрических и механических свойств. Поэтому надежная работа изоляции высоковольтных конструкций может быть обеспечена при соблюдении следующих условий:

1. Изоляция должна выдерживать с достаточной для практики надежностью возможные в эксплуатации перенапряжения;

2. Изоляция должна с достаточной для практики надежностью выдерживать длительно воздействующее рабочее напряжение с учетом возможных его изменений в допустимых пределах.

При выборе допустимых рабочих напряженностей электрического поля в значительном количестве типов изоляционных конструкций определяющими являются характеристики ЧР в изоляции [19].

Сущность метода частичных разрядов — определение значения частичного разряда или проверка того, что значение частичного разряда не превышает установленное значение при установленных напряжениях и чувствительности [20].

Электрический метод требует контакта измерительных приборов с объектом контроля. Но возможность получения комплекса характеристик, позволяющих всесторонне оценить свойства ЧР с определением их количественных значений, сделала этот метод весьма привлекательным и доступным. К основному недостатку этого метода можно отнести его сильную чувствительность к разного рода помехам [18].

Электромагнитный (дистанционный) метод позволяет обнаружить объект с ЧР с помощью направленного приемного СВЧ антенно-фидерного устройства. Этот метод не требует контактов измерительных приборов с контролируемым оборудованием и позволяет производить обзорное сканирование группы оборудования. Недостаток этого метода заключается в отсутствии количественной оценки какой-либо характеристики ЧР, как то заряд ЧР, ЧР, мощность и др. [18].

Применение диагностики методом измерения частичных разрядов возможно для следующих типов электрооборудования:

- 1) кабелей и кабельной продукции (муфт и т. д.);
- 2) комплектных распределительных устройств элегазовых (КРУЭ);
- 3) измерительных трансформаторов тока и напряжения;
- 4) силовых трансформаторов и вводов;
- 5) двигателей и генераторов;
- 6) разрядников и конденсаторов.

Основная опасность частичных разрядов связана со следующими факторами:

- невозможностью их выявления методом обычных испытаний повышенным выпрямленным напряжением;
- риском их быстрого перехода до состояния пробоя и, как следствие, создания аварийной ситуации на кабеле.

Среди основного оборудования для определения дефектов с помощью частичных разрядов можно выделить следующие типы оборудования:

**1) PD-Portable**



Рис. 13. Портативная система регистрации частичных разрядов

Портативная система регистрации частичных разрядов, которая состоит из генератора СНЧ-напряжения (Frida, Viola), блока связи и блока регистрации частичных разрядов.

*Особенностями данной системы являются:*

1. Упрощенная схема работы системы: не предполагает предварительной зарядки постоянным током, а выдает результат в режиме online.
2. Малые габариты и вес, позволяющие использовать систему в качестве переносной или монтировать практически на любом шасси.
3. Высокая точность измерений.
4. Простота эксплуатации.
5. Испытательное напряжение —  $U_0$ , что позволяет проводить диагностику состояния кабельных линий 35 кВ длиной до 13 км, а также кабелей 110 кВ.

**2) PHG-система**

Универсальная система диагностики состояния кабельных линий, включающая следующие подсистемы:

- генератор высокого напряжения PHG (СНЧ и выпрямленное постоянное напряжение до 80 кВ);



- измерение тангенса угла потерь TD;
- измерение частичных разрядов с локализацией источника PD.



Рис. 14. Универсальная система регистрации частичных разрядов

*Особенностями данной системы являются:*

1. Упрощенная схема работы системы: не предполагает предварительной зарядки постоянным током, а выдает результат в режиме online;
2. Универсальность: четыре прибора в одном (испытательная установка выпрямленным напряжением до 80 кВ с функцией первичного прожига (до 90 мА), генератор СНЧ-напряжения до 80 кВ, система измерения тангенса угла потерь, система регистрации частичных разрядов);
3. Возможность постепенного формирования системы от генератора высокого напряжения до системы диагностики кабельных линий;
4. Простота эксплуатации;
5. Возможность проведения полной диагностики состояния кабельной линии;
6. Возможность трассировки кабеля;
7. Оценка динамики старения изоляции на основе архивов данных по результатам испытаний.

При помощи данных системы решаются следующие задачи:

- проверка рабочих характеристик испытываемых объектов;
- планирование обслуживания и замены муфт и секций кабеля и проведения профилактических мероприятий;
- значительное сокращение количества вынужденных простоев;
- увеличение сроков службы кабельных линий за счет использования шадающего уровня испытательного напряжения.

## 7. Вибродиагностика

---

В каждой машине действуют динамические силы. Эти силы — источник не только шума и вибрации, но и дефектов, которые изменяют свойства сил и, соответственно, характеристики шума и вибрации. Можно сказать, что функциональная диагностика машин без смены режима их работы — это изучение динамических сил, а не собственно вибрации или шума. Последние просто содержат в себе информацию о динамических силах, но в процессе преобразования сил в вибрацию или шум часть информации теряется.

Еще больше информации теряется при преобразовании сил и совершаемой ими работы в тепловую энергию. Именно поэтому из двух видов сигналов (температура и вибрация) в диагностике предпочтение следует отдать вибрации. Говоря простым языком, **вибрация** — это механические колебания тела около положения равновесия.

За последние несколько десятилетий вибрационная диагностика стала основой контроля и прогноза состояния вращающегося оборудования. Физической причиной ее быстрого развития является огромный объем диагностической информации, содержащейся в колебательных силах и вибрации машин, работающих как в номинальных, так и в специальных режимах. Техническим обеспечением вибрационной диагностики являются высокоточные средства измерения вибрации и цифровой обработки сигналов, возможности которых непрерывно растут, а стоимость снижается.

В настоящее время диагностическая информация о состоянии вращающегося оборудования извлекается из параметров не только вибрации, но и других процессов, в том числе рабочих и вторичных, протекающих в машинах. Естественно, что развитие диагностических систем идет по пути расширения получаемой информации не только за счет усложнения методов анализа сигналов, но и за счет расширения количества контролируемых процессов.

Вибрационная диагностика, как и любая другая диагностика, включает в себя три основных направления:

- параметрическую диагностику;
- диагностику неисправностей;
- превентивную диагностику.

Как было сказано выше, **параметрическая диагностика** используется для аварийной защиты и управления оборудованием, а диагностическая информация содержится в совокупности отклонений величин этих пара-

метров от номинальных значений. Системы параметрической диагностики обычно включают в себя несколько каналов контроля различных процессов, в том числе вибрации и температуры отдельных узлов оборудования. Объем используемой вибрационной информации в таких системах ограничен, т. е. каждый вибрационный канал контролирует два параметра, а именно величину нормируемой низкочастотной вибрации и скорость ее нарастания. Обычно вибрация нормируется в стандартной полосе частот от 2 (10) Гц до 1000 (2000) Гц. Величина контролируемой низкочастотной вибрации не всегда определяет реальное состояние оборудования, но в предаварийной ситуации, когда появляются цепочки быстро развивающихся дефектов, их связь существенно вырастает. Это позволяет эффективно использовать средства аварийной защиты оборудования по величине низкочастотной вибрации. Наибольшее применение находят упрощенные вибрационные системы аварийной сигнализации. Такие системы чаще всего используются для своевременного обнаружения ошибок персонала, управляющего оборудованием.

**Диагностика неисправностей** в данном случае — это вибрационное обслуживание вращающегося оборудования, называемое виброналадкой, которое выполняется по результатам контроля его вибрации прежде всего для обеспечения безопасных уровней вибрации высокооборотных ответственных машин со скоростью вращения  $\sim 3000$  об./мин и выше. Именно в высокооборотных машинах повышенная вибрация на частоте вращения и кратных частотах существенным образом снижает ресурс машины, с одной стороны, а с другой — чаще всего является следствием появления в машине или фундаменте отдельных дефектов. Выявление опасного роста вибрации машины в установившихся или переходных (пусковых) режимах работы с последующим определением и устранением причин этого роста является основной задачей виброналадки.

В рамках виброналадки после обнаружения причин роста вибрации выполняется ряд сервисных работ, таких как центровка, балансировка, изменение колебательных свойств (отстройка от резонансов) машины, а также замена смазки и устранение тех дефектов в узлах машины или фундаментных конструкциях, которые повлекли за собой опасный рост вибрации.

Превентивная диагностика машин и оборудования — это обнаружение всех потенциально опасных дефектов на ранней стадии развития, наблюдение за их развитием и на этой основе долгосрочный прогноз состояния оборудования. Вибрационная превентивная диагностика машин как самостоятельное направление в диагностике начала формироваться лишь в конце 80-х годов прошлого века.

Основной задачей превентивной диагностики является не только обнаружение, но и идентификация зарождающихся дефектов. Знание вида каждого из обнаруженных дефектов позволяет резко повысить достоверность прогноза, так как каждый вид дефекта имеет свою скорость развития.

Системы превентивной диагностики состоят из средств измерения наиболее информативных процессов, протекающих в машине, средств или программного обеспечения для анализа измеряемых сигналов и программного обеспечения для распознавания и долгосрочного прогноза состояния машины. К наиболее информативным процессам обычно относят вибрацию машины и ее тепловое излучение, а также ток, потребляемый электродвигателем, используемым в качестве электропривода, и состав смазки. К настоящему времени не определены лишь наиболее информативные процессы, позволяющие с высокой достоверностью определять и прогнозировать состояние электрической изоляции в электрических машинах.

Превентивная диагностика, основанная на анализе одного из сигналов, например вибрации, имеет право на существование лишь в тех случаях, когда позволяет обнаружить абсолютное (более 90 %) число потенциально опасных видов дефектов на ранней стадии развития и дать прогноз безаварийной работы машины на срок, достаточный для подготовки к текущему ремонту. Такая возможность в настоящее время может быть реализована не для всех типов машин и не для всех отраслей промышленности.

Наибольшие успехи превентивной вибрационной диагностики связаны с прогнозом состояния низкооборотного нагруженного оборудования, используемого, например, в металлургии, бумажной и полиграфической промышленности. В таком оборудовании вибрация не оказывает решающего влияния на его надежность, т. е. специальные меры по снижению вибрации применяются крайне редко. В этой ситуации параметры вибрации наиболее полно отражают состояние узлов оборудования, и с учетом доступности этих узлов для периодического измерения вибрации, превентивная диагностика дает максимальный эффект при минимальных затратах.

Сложнее всего вопросы превентивной вибрационной диагностики решаются для машин возвратно-поступательного действия и высокооборотных газотурбинных двигателей. В первом случае полезный сигнал вибрации во много раз перекрыт вибрацией от ударных импульсов, возникающих при смене направления движения инерционных элементов, а во втором — шумом потока, который создает сильную вибрационную помеху в тех точках контроля, которые доступны для периодического измерения вибрации.

Успехи превентивной вибрационной диагностики среднеоборотных машин со скоростью вращения от ~300 до ~3000 об./мин также зависят от типа диагностируемых машин и от особенностей их работы в разных отраслях промышленности. Наиболее просто решаются задачи контроля и прогноза состояния широко распространенного насосного и вентиляционного оборудования, особенно если в нем используются подшипники качения и асинхронный электропривод. Такое оборудование применяется практически во всех отраслях промышленности и в городском хозяй-

стве, и его перевод на обслуживание и ремонт по фактическому состоянию не требует больших финансовых и временных затрат.

Свою специфику имеет превентивная диагностика на транспорте, которая выполняется не в движении, а на специальных стендах. Во-первых, интервалы между диагностическими измерениями в этом случае не определяются реальным состоянием оборудования, а планируются по данным о пробеге. Во-вторых, отсутствует контроль режимов работы оборудования в этих интервалах, а всякое нарушение условий эксплуатации может резко ускорить развитие дефектов. В-третьих, диагностика осуществляется не в номинальных режимах работы оборудования, в которых происходит развитие дефектов, а в специальных стендовых, в которых дефект может не изменять контролируемые параметры вибрации, либо изменять их не так, как в номинальных режимах работы. Все сказанное требует специальных доработок традиционных систем превентивной диагностики применительно к разным видам транспорта, проведения их опытной эксплуатации и обобщения полученных результатов. К сожалению, подобная работа часто даже не планируется, хотя, например, количество комплексов превентивной диагностики, используемых на железных дорогах, составляет несколько сотен, а количество мелких фирм, поставляющих эту продукцию на предприятия отрасли, превышает десяток.

Работающий агрегат — источник большого количества колебаний различной природы. Основные динамические силы, действующие в машинах роторного типа (а именно турбины, турбокомпрессоры, электродвигатели, генераторы, насосы, вентиляторы и т. д.), возбуждая их вибрацию или шум, представлены ниже. Из сил *механической природы* следует выделить:

1. Центробежные силы, определяемые неуравновешенностью вращающихся узлов;
2. Кинематические силы, определяемые неровностью взаимодействующих поверхностей и прежде всего поверхностей трения в подшипниках;
3. Параметрические силы, определяемые в первую очередь переменной составляющей жесткости вращающихся узлов или опор вращения;
4. Силы трения, которые далеко не всегда можно считать механическими, но почти всегда они являются результатом суммарного действия множества микроударов с деформацией (упругой) контактирующих микронеровностей на поверхностях трения;
5. Силы ударного вида, возникающие при взаимодействии отдельных элементов трения, сопровождающемся их упругой деформацией.

Из сил *электромагнитного происхождения* в электрических машинах следует выделить:

1. Магнитные силы, определяемые изменениями магнитной энергии в определенном ограниченном пространстве, как правило, в ограниченном по протяженности участке воздушного зазора;

2. Электродинамические силы, определяемые взаимодействием магнитного поля с электрическим током;

3. Магнитострикционные силы, определяемые эффектом магнитострикции, т. е. изменением линейных размеров магнитного материала под действием магнитного поля.

Из сил аэродинамического происхождения следует выделить:

1. Подъемные силы, т. е. силы давления на тело, например, лопасть рабочего колеса, движущаяся в потоке либо обтекаемая потоком;

2. Силы трения на границе потока и неподвижных частей машины (внутренней стенки трубопровода и т. п.);

3. Пульсации давления в потоке, определяемые его турбулентностью, срывом вихрей и т. п.

Ниже представлены примеры дефектов, выявляемых вибродиагностикой:

- 1) небаланс масс ротора;
- 2) расцентровка;
- 3) механическое ослабление (дефект изготовления или естественный износ);
- 4) задевания (затирания) и т. д.

*Небаланс вращающихся масс ротора:*

а) дефект изготовления вращающегося ротора или его элементов на заводе, на ремонтном предприятии, недостаточный выходной контроль предприятия-изготовителя оборудования, удары при перевозке, плохие условия хранения;

б) неправильная сборка оборудования при первичном монтаже или после выполненного ремонта;

в) наличие на вращающемся роторе изношенных, сломанных, дефектных, недостающих, недостаточно прочно закрепленных и т. д. деталей и узлов;

г) результат воздействия параметров технологических процессов и особенностей эксплуатации данного оборудования, приводящих к неравномерному нагреву и искривлению роторов.

*Расцентровка*

Взаимное положение центров валов двух соседних роторов в практике принято характеризовать термином «центровка».

Если же осевые линии валов не совпадают, то говорят о плохом качестве центровки и используется термин «расцентровка двух валов».

Качество центровки нескольких механизмов определяется правильно-стью монтажа линии вала агрегата, контролируемой по центрам опорных подшипников вала.

Причин появления расцентровок в работающем оборудовании доста-точно много. Это процессы износа, влияние технологических параметров, изменение свойств фундамента, искривление подводящих трубопроводов под воздействием изменения температуры на улице, изменение режима работы и т. д.

#### *Механическое ослабление*

Достаточно часто под термином «механическое ослабление» понима-ется сумма нескольких различных дефектов, имеющих в конструкции или являющихся следствием особенностей эксплуатации: чаще всего ви-брации при механических ослаблениях вызываются соударениями враща-ющихся деталей между собой или соударениями подвижных элементов ротора с неподвижными элементами конструкции, например с обоями подшипников.

Все эти причины сведены воедино и имеют здесь общее название «ме-ханические ослабления» потому, что в спектрах вибросигналов они дают качественно примерно одинаковые картины.

Механические ослабления, являющиеся дефектом изготовления, сборки и эксплуатации: всевозможные чрезмерно свободные посадки деталей вра-щающихся роторов, сопряженные с наличием нелинейностей типа «люфт», имеющих место также и в подшипниках, муфтах, самой конструкции.

Механические ослабления, являющиеся результатом естественного износа конструкции, особенностей эксплуатации, следствием разрушения элементов конструкции. В эту же группу следует относить все возможные трещины и дефекты в конструкции и фундаменте, увеличения зазоров, воз-никшие в процессе эксплуатации оборудования.

Тем не менее такие процессы тесно связаны с вращением валов.

#### *Задевания*

Задевания и «затирания» элементов оборудования друг о друга различ-ной первопричины имеют место в процессе работы оборудования достаточ-но часто и по своему происхождению могут быть разделены на две группы:

- нормальные конструктивные задевания и затирания в различного типа уплотнениях, используемых в насосах, компрессорах и т. д.;
- итог, или даже последняя стадия, проявления в агрегате других дефектов состояния конструкции, например износ опорных элементов, уменьшение или увеличение технологических зазоров и уплотнений, ис-кривление конструкций.

Задеванием в практике называют обычно процесс прямого контакти-рования вращающихся частей ротора с неподвижными элементами кон-струкции агрегата или фундамента.

Контактирование по своей физической сути (в некоторых источниках применяются термины «трение» или «затириание») может иметь локальный характер, но только на начальных стадиях. На последних стадиях своего развития задевание обычно происходит непрерывно в течение всего оборота.

*Техническим обеспечением* вибрационной диагностики являются высокоточные средства измерения вибрации и цифровой обработки сигналов, возможности которых непрерывно растут, а стоимость снижается.

*Основные типы оборудования для вибрационного контроля:*

1. Портативное оборудование;
2. Стационарное оборудование;
3. Оборудование для балансировки;
4. Диагностические системы;
5. Программное обеспечение.

По результатам замеров вибродиагностики составляются формы сигналов и спектры вибрации.

Сравнение формы сигналов, но уже с эталонной, можно осуществлять с помощью еще одной информационной спектральной технологии, основанной на узкополосном спектральном анализе сигналов. При использовании такого вида анализа сигналов диагностическая информация содержится в соотношении амплитуд и начальных фаз основной составляющей и каждой из кратных ей по частоте составляющих.

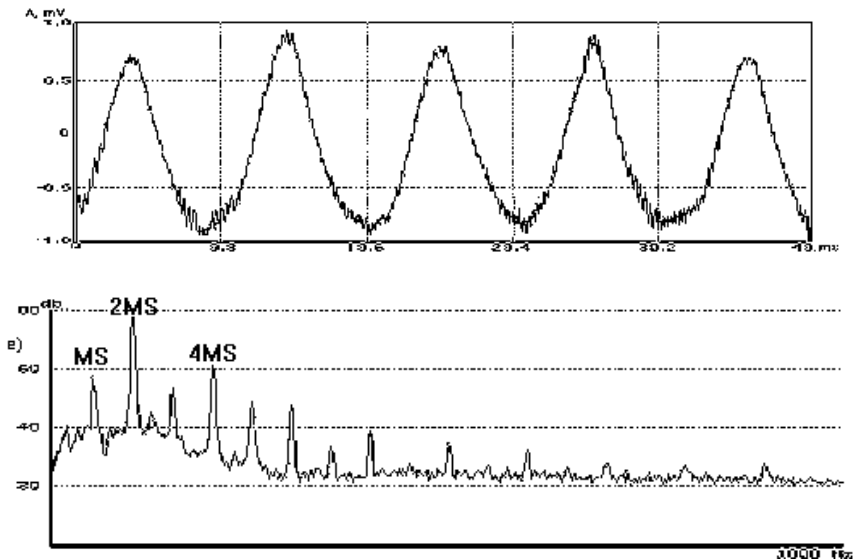


Рис. 30. Формы и спектры вибрации сердечника трансформатора, работающего в нормальном режиме



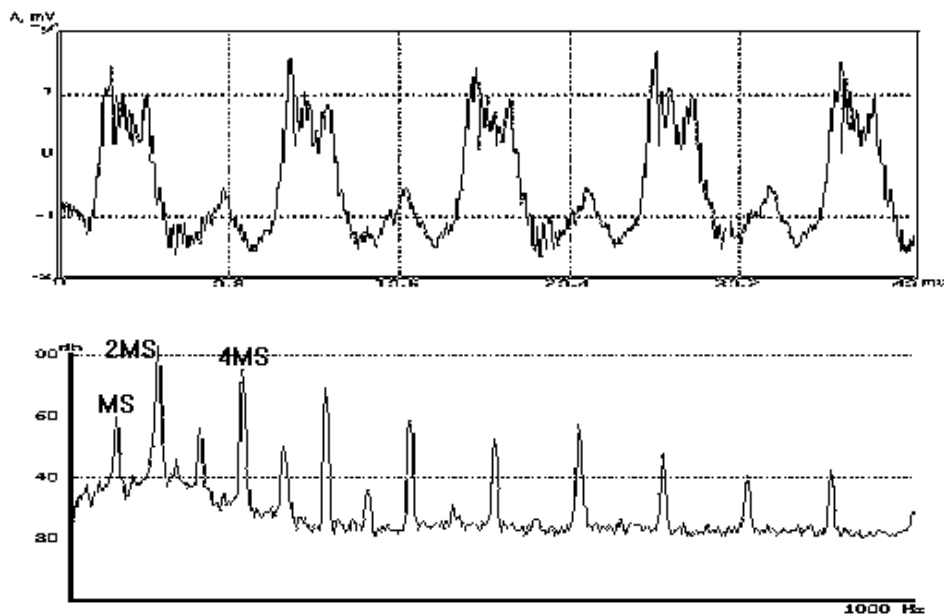


Рис. 16. Формы и спектры вибрации сердечника трансформатора при перегрузке, сопровождающейся магнитным насыщением сердечника

Спектры сигнала вибрации: их анализ показывает, что появление магнитного насыщения активного сердечника сопровождается искажением формы и ростом составляющих вибрации на гармониках питающего напряжения.

## 8. Магнитная структуроскопия

**Магнитные методы** неразрушающего контроля применяют в основном для контроля изделий из ферромагнитных материалов, т. е. изделий, которые под воздействием внешнего (намагничивающего) магнитного поля изменяют свои магнитные характеристики: магнитную проницаемость, величины и направления магнитного потока, вследствие возмущений поля, вызванных дефектами. К ферромагнитным материалам относятся: железо, сталь, чугун, никель, кобальт и некоторые сплавы (алюминия с никелем и др.) — материалы, из которых изготавливается большая часть электротехнического оборудования на станциях и подстанциях.

**Магнитный неразрушающий контроль** основан на выявлении различными способами магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами, или на определении и оценке магнитных свойств объекта контроля.

Таблица 5

Виды магнитных методов

№ п/п	Метод контроля	Основной параметр контроля	Цель проведения контроля
1	Магнитопорошковый	Рисунок из порошка над магнитным полем рассеяния	Обнаружение дефектов типа нарушения сплошности металла (поверхностные, подповерхностные и внутренние дефекты)
2	Магнитографический	Намагниченность ленты над магнитным полем рассеяния	
3	Индукционный	Мгновенная ЭДС, индуцируемая в перемещаемой катушке	
4	Феррозондовый	ЭДС, пропорциональная градиенту или напряженности измеряемого магнитного поля	Измерение толщины листов жести, немагнитных покрытий, упрочненного слоя и слоя поверхности закалки
5	Пондеромоторный	Сила притяжения постоянно-го магнита или электромагнита к контролируемому объекту	
6	Метод эффекта Холла	ЭДС Холла, возникающая в полупроводнике с током под воздействием поперечного магнитного поля	
7	Магниторезисторный	Электрическое сопротивление полупроводника с током, изменяющееся под воздействием внешнего магнитного поля	
8	Метод магнитной памяти	Зоны концентрации напряжений	—

**Магнитопорошковый метод** основан на выявлении магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами в детали при ее намагничивании, с использованием в качестве индикатора ферромагнитного порошка или магнитной суспензии. Этот метод среди других методов магнитного контроля нашел наибольшее применение. Примерно 80 % всех подлежащих контролю деталей из ферромагнитных материалов проверяется именно этим методом. Высокая чувствительность, универсальность, относительно низкая трудоемкость контроля и простота — все это обеспечило ему широкое применение в промышленности вообще и на транспорте в частности. Основным недостатком данного метода является сложность его автоматизации.

**Индукционный метод** предполагает использование приемной катушки индуктивности, перемещаемой относительно намагниченной детали или другого намагниченного контролируемого объекта. В катушке наводится (индуцируется) ЭДС, величина которой зависит от скорости относительно-го перемещения катушки и характеристик магнитных полей дефектов.

Метод магнитной дефектоскопии, при котором измерение искажений магнитного поля, возникающих в местах дефектов в изделиях из ферромагнитных материалов, осуществляется **феррозондами**. Прибор для измерения и индикации магнитных полей (в основном постоянных или медленно меняющихся) и их градиентов.

**Метод эффекта Холла** основан на выявлении магнитных полей преобразователями Холла. Сущность эффекта Холла заключается в возникновении поперечной разности потенциалов (ЭДС Холла) в прямоугольной полупроводниковой пластинке в результате искривления пути протекающего через эту пластинку электрического тока под воздействием магнитного потока, перпендикулярного этому току. Метод эффекта Холла используют для обнаружения дефектов, измерения толщины покрытий, контроля структуры и механических свойств ферромагнетиков, регистрации магнитных полей.

**Пондеромоторный метод** основан на измерении силы отрыва постоянного магнита или сердечника электромагнита от контролируемого объекта. Иными словами, этот метод основан на пондеромоторном взаимодействии измеряемого магнитного поля и магнитного поля рамки с током, электромагнита или постоянного магнита.

**Магниторезисторный метод** основан на выявлении магнитных полей магниторезистивными преобразователями, представляющими собой гальваномагнитный элемент, принцип работы которого основан на магниторезистивном эффекте Гаусса. Этот эффект связан с изменением продольного сопротивления проводника с током под действием магнитного поля. Электрическое сопротивление при этом увеличивается вследствие искривления траектории носителей заряда под воздействием магнитного поля. Количе-

ственно этот эффект проявляется по-разному и зависит от материала гальваномагнитного элемента и его формы. Для проводниковых материалов этот эффект не характерен. В основном он проявляется в некоторых полупроводниках с высокой подвижностью носителей тока.

**Магнитопорошковая дефектоскопия** основана на выявлении локальных магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектом, с помощью ферромагнитных частиц, играющих роль индикатора. Магнитное поле рассеяния возникает над дефектом вследствие того, что в намагниченной детали магнитные силовые линии, встречая на своем пути дефект, огибают его как препятствие с малой магнитной проницаемостью, в результате чего магнитное поле искажается, отдельные магнитные силовые линии вытесняются дефектом на поверхность, выходят из детали и входят в нее обратно. Магнитное поле рассеяния в зоне дефекта тем больше, чем больше дефект и чем ближе он к поверхности детали.

Таким образом, магнитные методы неразрушающего контроля можно применять ко всему электрооборудованию, состоящему из ферромагнитных материалов.

## 9. Акустические методы контроля

---

Акустические методы контроля применяются для контроля изделий, радиоволны в материале которых затухают не сильно: диэлектрики (стекло-волокно, пластмассы, керамика), полупроводники, магнитодиэлектрики (ферриты), тонкостенные металлические материалы.

Недостаток неразрушающего контроля радиоволновым методом — низкая разрешающая способность устройств, в основе работы которых лежит данный метод, из-за малой глубины проникновения радиоволн.

*Акустические методы* НК подразделяют на две большие группы: активные и пассивные методы. Активные методы основаны на излучении и приеме упругих волн, пассивные — только на приеме волн, источником которых служит сам объект контроля, например образование трещин сопровождается возникновением акустических колебаний, выявляемых акустико-эмиссионным методом.

Активные методы делят на методы отражения, прохождения, комбинированные (использующие как отражение, так и прохождение), собственных колебаний.

Методы отражения основаны на анализе отражения импульсов упругих волн от неоднородностей или границ объекта контроля, методы прохождения — на влиянии параметров объекта контроля на характеристики прошедших через него волн. Комбинированные методы используют влияние параметров объекта контроля как на отражение, так и на прохождение упругих волн. В методах собственных колебаний о свойствах объекта контроля судят по параметрам его свободных или вынужденных колебаний (их частотам и величине потерь).

Таким образом, по характеру взаимодействия упругих колебаний с контролируемым материалом акустические методы подразделяют на следующие основные методы:

- 1) прошедшего излучения (теневого, зеркально-теневого);
- 2) отраженного излучения (эхо-импульсный);
- 3) резонансный;
- 4) импедансный;
- 5) свободных колебаний;
- 6) акустико-эмиссионный.

По характеру регистрации первичного информативного параметра акустические методы подразделяются на амплитудный, частотный, спектральный.

Акустические методы неразрушающего контроля решают следующие контрольно-измерительные задачи:

1. Метод прошедшего излучения выявляет глубинные дефекты типа нарушения сплошности, расслоения, непроклепа, непропаев;
2. Метод отраженного излучения обнаруживает дефекты типа нарушения сплошности, определяет их координаты, размеры, ориентацию путем прозвучивания изделия и приема отраженного от дефекта эхо-сигнала;
3. Резонансный метод применяется в основном для измерения толщины изделия (иногда применяют для обнаружения зоны коррозионного поражения, непропаев, расслоений в тонких местах из металлов);
4. Акустико-эмиссионный метод обнаруживает и регистрирует только развивающиеся или способные к развитию под действием механической нагрузки трещины (квалифицирует дефекты не по размерам, а по степени их опасности во время эксплуатации). Метод имеет высокую чувствительность к росту дефектов — обнаруживает увеличение трещины на (1...10) мкм, причем измерения, как правило, проходят в рабочих условиях при наличии механических и электрических шумов;
5. Импедансный метод предназначен для контроля клеевых, сварных и паяных соединений, имеющих тонкую обшивку, приклеенную или припаянную к элементам жесткости. Дефекты клеевых и паяных соединений выявляются только со стороны ввода упругих колебаний;
6. Метод свободных колебаний применяется для обнаружения глубинных дефектов.

Акустические сигналы в оборудовании, вызванные электрическими разрядами, можно обнаружить даже на фоне помех: вибростука, шума маслососов и вентиляторов и т. п.

Сущность акустического метода состоит в создании в месте повреждения разряда и прослушивании звуковых колебаний, возникающих над местом повреждения.

Акустические методы применяются не только к крупногабаритному оборудованию (к примеру, трансформаторам), но также и к такому оборудованию, как кабельная продукция.

Сущность акустического метода для кабельных линий состоит в создании в месте повреждения искрового разряда и прослушивании на трассе вызванных этим разрядом звуковых колебаний, возникающих над местом повреждения. Этот метод применяют для обнаружения на трассе всех видов повреждения с условием, что в месте повреждения может быть создан электрический разряд. Для возникновения устойчивого искрового разряда необходимо, чтобы величина переходного сопротивления в месте повреждения превышала 40 Ом.

Слышимость звука с поверхности земли зависит от глубины залегания кабеля, плотности грунта, вида повреждения кабеля и мощности разряд-

ного импульса. Глубина прослушивания колеблется в пределах от 1 до 5 м. Применение этого метода на открыто проложенных кабелях, кабелях в каналах, туннелях не рекомендуется, так как из-за хорошего распространения звука по металлической оболочке кабеля можно допустить большую ошибку в определении места повреждения.

В качестве акустического датчика используют датчики пьеза- или электромагнитной системы, преобразующие механические колебания грунта в электрические сигналы, поступающие на вход усилителя звуковой частоты. Над местом повреждения сигнал наибольший.

Сущность ультразвуковой дефектоскопии заключается в явлении распространения в металле ультразвуковых колебаний с частотами, превышающими 20000 Гц, и отражения их от дефектов, нарушающих сплошность металла (трещин, раковин и пр.).

Акустические сигналы в оборудовании, вызванные электрическими разрядами, можно обнаружить даже на фоне помех: вибростука, шума маслососов и вентиляторов и т. п.

Сущность акустического метода состоит в создании в месте повреждения разряда и прослушивании звуковых колебаний, возникающих над местом повреждения. Этот метод применяют для обнаружения всех видов повреждения с условием, что вместе повреждения может быть создан электрический разряд.

### ***Методы отражения***

В этой группе методов информацию получают по отражению акустических волн в ОК.

*Эхометод* основан на регистрации эхосигналов от дефектов — несплошностей. Он похож на радио- и гидролокацию. Другие методы отражения применяют для поиска дефектов, плохо выявляемых эхометодом, и для исследования параметров дефектов.

*Эхозеркальный метод* основан на анализе акустических импульсов, зеркально отраженных от донной поверхности ОК и дефекта. Вариант этого метода, рассчитанный на выявление вертикальных дефектов, называют *методом тандем*.

*Дельта-метод* основан на использовании дифракции волн на дефекте. Часть падающей на дефект поперечной волны от излучателя рассеивается во все стороны на краях дефекта, причем частично превращается в продольную волну. Часть этих волн принимается приемником продольных волн, расположенным над дефектом, а часть отражается от донной поверхности и также поступает на приемник. Варианты этого метода предполагают возможность перемещения приемника по поверхности, изменения типов излучаемых и принимаемых волн.

*Дифракционно-временной метод* (ДВМ) основан на приеме волн, рассеянных на концах дефекта, причем могут излучаться и приниматься как продольные, так и поперечные волны.

*Акустическая микроскопия* отличается от эхометода повышением на один-два порядка частоты УЗ, применением острой фокусировки и автоматическим или механизированным сканированием объектов небольшого размера. В результате удается зафиксировать небольшие изменения акустических свойств в ОК. Метод позволяет достичь разрешающей способности в сотые доли миллиметра.

*Когерентные методы* отличаются от других методов отражения тем, что в качестве информационного параметра помимо амплитуды и времени прихода импульсов используется также фаза сигнала. Благодаря этому повышается на порядок разрешающая способность методов отражения и появляется возможность наблюдать изображения дефектов, близкие к реальным.

### ***Методы прохождения***

Эти методы, в России чаще называемые *теневыми*, основаны на наблюдении изменения параметров прошедшего через ОК акустического сигнала (сквозного сигнала). На начальном этапе развития использовали непрерывное излучение, а признаком дефекта было уменьшение амплитуды сквозного сигнала, вызванное образуемой дефектом звуковой тенью. Поэтому термин «теневой» адекватно отражал содержание метода. Однако в дальнейшем области применения рассматриваемых методов расширились.

Методы начали применять для определения физико-механических свойств материалов, когда контролируемые параметры не связаны с образующими звуковую тень нарушениями сплошности.

Таким образом, теневой метод можно рассматривать как частный случай более общего понятия «метод прохождения».

При контроле методами прохождения излучающий и приемный преобразователи располагают по разные стороны от ОК или контролируемого участка. В некоторых методах прохождения преобразователи размещают с одной стороны от ОК на определенном расстоянии друг от друга. Информацию получают, измеряя параметры прошедшего от излучателя к приемнику сквозного сигнала.

*Амплитудный метод прохождения* (или амплитудный теневой метод) основан на регистрации уменьшения амплитуды сквозного сигнала под влиянием дефекта, затрудняющего прохождение сигнала и создающего звуковую тень.

*Временной метод прохождения* (временной теневой метод) основан на измерении запаздывания импульса, вызванного огибанием дефекта. При этом, в отличие от велосиметрического метода, тип упругой волны (обычно продольной) не меняется. В этом методе информационным параметром служит время прихода сквозного сигнала. Метод эффективен при контроле материалов с большим рассеянием УЗ, например бетона и т. п.

*Метод многократной тени* аналогичен амплитудному методу прохождения (теневому), но о наличии дефекта судят при этом по амплитуде



сквозного сигнала (теневого импульса), многократно (обычно двукратно) прошедшего между параллельными поверхностями изделия. Метод более чувствителен, чем теневой или зеркально-теневой, так как волны проходят через дефектную зону несколько раз, но менее помехоустойчив.

Рассмотренные выше разновидности метода прохождения используют для обнаружения дефектов типа нарушения сплошности.

**Фотоакустическая микроскопия.** В фотоакустической микроскопии акустические колебания генерируются вследствие термоупругого эффекта при освещении ОК модулированным световым потоком (например, импульсным лазером), сфокусированным на поверхности ОК. Энергия светового потока, поглощаясь материалом, порождает тепловую волну, параметры которой зависят от теплофизических характеристик ОК. Тепловая волна приводит к появлению термоупругих колебаний, которые регистрируются, например, пьезоэлектрическим детектором.

**Велосиметрический метод** основан на регистрации изменения скорости упругих волн в зоне дефекта. Например, если в тонком изделии распространяется изгибная волна, то появление расслоения вызывает уменьшение ее фазовой и групповой скоростей. Это явление фиксируют по сдвигу фазы прошедшей волны или запаздыванию прихода импульса.

**Ультразвуковая томография.** Этот термин часто применяют в отношении различных систем визуализации дефектов. Между тем первоначально он применялся для УЗ-систем, в которых пытались реализовать подход, повторяющий рентгеновскую томографию, т. е. сквозное прозвучивание ОК по разным направлениям с выделением особенностей ОК, полученных при разных направлениях лучей.

**Метод лазерного детектирования.** Известны методы визуального представления акустических полей в прозрачных жидкостях и твердых средах, основанные на дифракции света на упругих волнах.

**Термоакустический метод** контроля называют также УЗ-локальной термографией. Метод состоит в том, что в ОК вводятся мощные низкочастотные ( $\sim 20$  кГц) УЗ-колебания. На дефекте они превращаются в теплоту. Чем больше влияние дефекта на упругие свойства материала, тем больше величина упругого гистерезиса и тем больше выделение теплоты. Повышение температуры фиксируется термовизором.

### **Комбинированные методы**

Эти методы содержат признаки как методов отражения, так и методов прохождения.

**Зеркально-теневой (ЗТ) метод** основан на измерении амплитуды донного сигнала. По технике выполнения (фиксируется эхосигнал) — это метод отражения, а по физической сущности (измеряют ослабление дефектом сигнала, дважды прошедшего ОК) он близок к теневому методу, поэтому его относят не к методам прохождения, а к комбинированным методам.

*Эхотеневой метод* основан на анализе как прошедших, так и отраженных волн.

*Реверберационно-сквозной* (акустико-ультразвуковой) метод сочетает признаки метода многократной тени и УЗ-реверберационного метода. На ОК небольшой толщины на некотором расстоянии друг от друга устанавливают прямые излучающий и приемный преобразователи. Излученные импульсы продольных волн после многократных отражений от стенок ОК достигают приемника. Наличие в ОК неоднородностей меняет условия прохождения импульсов. Дефекты регистрируют по изменению амплитуды и спектра принятых сигналов. Метод применяют для контроля изделий из ПКМ и соединений в многослойных конструкциях.

### ***Методы собственных колебаний***

Эти методы основаны на возбуждении в ОК вынужденных или свободных колебаний и измерении их параметров: собственных частот и величины потерь.

Свободные колебания возбуждают путем кратковременного воздействия на ОК (например, механическим ударом), после чего он колеблется в отсутствие внешних воздействий.

Вынужденные колебания создают воздействием внешней силы с плавно изменяемой частотой (иногда применяют длинные импульсы с переменной несущей частотой). Регистрируют резонансные частоты по увеличению амплитуды колебаний при совпадениях собственных частот ОК с частотами возмущающей силы. Под влиянием возбуждающей системы в некоторых случаях собственные частоты ОК немного изменяются, поэтому резонансные частоты несколько отличаются от собственных. Параметры колебаний измеряют, не прекращая действия возбуждающей силы.

Различают интегральные и локальные методы. В интегральных методах анализируют собственные частоты ОК как единого целого, в локальных — отдельных его участков. Информативными параметрами служат значения частот, спектры собственных и вынужденных колебаний, а также характеризующие потери добротность и логарифмический декремент затухания.

Интегральные методы свободных и вынужденных колебаний предусматривают возбуждение колебаний во всем изделии или на значительном его участке. Методы применяют для контроля физико-механических свойств изделий из бетона, керамики, металлического литья и других материалов. Эти методы не требуют сканирования и отличаются высокой производительностью, но не дают информации о месте расположения и характере дефектов.

Локальный метод свободных колебаний основан на возбуждении свободных колебаний на небольшом участке ОК. Метод применяют для контроля слоистых конструкций по изменению спектра частот в части изделия, возбуждаемой путем удара; для измерения толщин (особенно малых) труб и других ОК посредством воздействия кратковременным акустическим импульсом.

Локальный метод вынужденных колебаний (УЗ-резонансный метод) основан на возбуждении колебаний, частоту которых плавно изменяют. Для возбуждения и приема УЗ-колебаний используют совмещенный или отдельные преобразователи. При совпадении частот возбуждения с собственными частотами ОК (нагруженного приемопередающим преобразователем) в системе возникают резонансы. Изменение толщины вызовет смещение резонансных частот, появление дефектов — исчезновение резонансов.

*Акустико-топографический метод* имеет признаки как интегрального, так и локального методов. Он основан на возбуждении в ОК интенсивных изгибных колебаний непрерывно меняющейся частоты и регистрации распределения амплитуд упругих колебаний на поверхности контролируемого объекта с помощью наносимого на поверхность мелкодисперсионного порошка. На дефектном участке оседает меньшее количество порошка, что объясняется увеличением амплитуды его колебаний в результате резонансных явлений. Метод применяют для контроля соединений в многослойных конструкциях: биметаллических листах, сотовых панелях и т. п.

### ***Импедансные методы***

Эти методы основаны на анализе изменения механического импеданса или входного акустического импеданса участка поверхности ОК, с которым взаимодействует преобразователь. Внутри группы методы разделяют по типам возбуждаемых в ОК волн и по характеру взаимодействия преобразователя с ОК.

Метод применяют для контроля дефектов соединений в многослойных конструкциях. Его используют также для измерения твердости и других физико-механических свойств материалов.

Отдельным методом хотелось бы рассмотреть метод ультразвуковой дефектоскопии.

Ультразвуковая дефектоскопия применяется не только к крупногабаритному оборудованию (к примеру, трансформаторы), но также и к кабельной продукции.

Основные типы оборудования для ультразвуковой дефектоскопии:

1. Осциллограф, позволяющий регистрировать осциллограмму сигнала и его спектр;



Рис. 17. Осциллограф

2. Ультразвуковой зонд, в котором используются гетеродинирование сигнала и прослушивание преобразованного спектра сигнала через наушники;



Рис. 18. Зонд

3. Ультразвуковой модератор, который позволяет записать, замедлить и услышать ультразвуковой сигнал.



Рис. 19. Модератор

## 10. Акустико-эмиссионная диагностика

.....

Акустическая эмиссия — это мощное техническое средство неразрушающего тестирования и оценки материалов. Она основана на обнаружении упругих волн, генерируемых внезапной деформацией напряженного материала.

Эти волны распространяются от источника к датчику (датчикам), где они преобразуются в электрические сигналы. Приборы АЭ измеряют эти сигналы и отображают данные, на основе которых оператор оценивает состояние и поведение структуры под напряжением.

Традиционные методы неразрушающего контроля (ультразвуковой, радиационный, токовихревой) обнаруживают геометрические неоднородности путем излучения в исследуемую структуру некоторой формы энергии.

Акустическая эмиссия использует другой подход: она обнаруживает микроскопические движения, а не геометрические неоднородности. Рост трещины, разлом включения и утечка жидкости или газа — вот примеры из сотен процессов, производящих акустическую эмиссию, которая может быть обнаружена и эффективно исследована с помощью этой технологии.

С точки зрения АЭ, растущий дефект производит свой собственный сигнал, который проходит метры, а иногда и десятки метров, пока не достигнет датчиков. Дефект не только может быть обнаружен дистанционно; часто представляется возможным найти его местоположение путем обработки разницы времен прихода волн к различным датчикам.

Преимущества метода АЭ контроля:

1. Метод обеспечивает обнаружение и регистрацию только развивающихся дефектов, что позволяет классифицировать дефекты не по размерам, а по степени их опасности;

2. В производственных условиях метод АЭ позволяет выявить приращение трещины на десятые доли миллиметра;

3. Свойство интегральности метода обеспечивает контроль всего объекта с использованием одного или нескольких преобразователей АЭ, неподвижно установленных на поверхности объекта за один раз;

4. Положение и ориентация дефекта не влияют на выявляемость;

5. Метод АЭ имеет меньше ограничений, связанных со свойствами и структурой конструкционных материалов, чем другие методы неразрушающего контроля;

6. Осуществляется контроль зон, недоступных для других методов (тепло- и гидроизоляция, конструктивные особенности);

7. Метод АЭ предотвращает катастрофические разрушения конструкций при испытаниях и эксплуатации за счет оценки скорости развития дефектов;

8. Метод определяет места течей.

## 11. Радиационный метод диагностики

---

Используются рентгеновское, гамма-излучение, потоки нейтринов и т. д. Проходя через толщу изделия, проникающие излучения по-разному ослабляются в дефектном и бездефектном сечениях и несут информацию о внутреннем строении вещества и наличии дефектов внутри изделия.

Радиационные методы контроля используются для контроля сварных и паяных швов, отливок, проката и т. п. Они относятся к одному из видов неразрушающего контроля.

При разрушающих методах испытаний проводят выборочный контроль (например, по вырезанным образцам) серии однотипной продукции и статистически оценивают ее качества, не устанавливая качества каждого конкретного изделия. В то же время к некоторой продукции предъявляются высокие требования по качеству, вызывающие необходимость проведения сплошного контроля. Такой контроль обеспечивается методами неразрушающего контроля, которые в основном поддаются автоматизации и механизации.

Качество продукции определяется, согласно ГОСТ 15467–79, совокупностью свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением. Это емкое и обширное понятие, на которое оказывает влияние многообразие технологических и конструктивно-эксплуатационных факторов. Для объективного анализа качества продукции и управления им привлекают не только комплекс методов неразрушающего контроля, но и разрушающие испытания и разные проверки и контроль на различных этапах изготовления продукции. Для ответственных изделий, рассчитанных с минимальным запасом прочности и эксплуатируемых в тяжелых условиях, применяют стопроцентный неразрушающий контроль.

Под радиационным неразрушающим контролем понимается вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации и анализе проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия с контролируемым объектом. В основе радиационных методов контроля лежит получение дефектоскопической информации об объекте с помощью ионизирующего излучения, прохождение которого через вещество сопровождается ионизацией атомов и молекул среды. Результаты контроля определяются природой и свойствами используемого ионизирующего излучения, физико-техническими характеристиками контролируемого объекта, типом и свой-

ствами детектора (регистратора), технологией контроля и квалификацией дефектоскопистов.

Различают непосредственно и косвенно ионизирующие излучения. Непосредственно ионизирующее излучение — ионизирующее излучение, состоящее из заряженных частиц (электроны, протоны,  $\alpha$ -частицы и др.), обладающих достаточной кинетической энергией для того, чтобы при столкновении ионизировать среду. Косвенно ионизирующее излучение — ионизирующее излучение, состоящее из фотонов, нейтронов или других незаряженных частиц, которые могут создавать непосредственно ионизирующее излучение и (или) вызывать ядерные превращения.

В качестве детекторов в радиационных методах применяют рентгенографические пленки, полупроводниковые газоразрядные и сцинтилляционные счетчики, ионизационные камеры и др.

### ***Назначение методов***

Радиационные методы дефектоскопического контроля предназначены для обнаружения макроскопических нарушений сплошности материала контролируемых дефектов, возникающих при изготовлении (трещины, пористость, раковины и др.), для определения внутренней геометрии деталей, узлов и агрегатов (разностенность и отклонения формы внутренних контуров от заданных по чертежу в деталях с закрытыми полостями, неправильная сборка узлов, зазоры, неплотные прилегания в соединениях и т. п.). Радиационные методы используют также для выявления дефектов, появившихся в процессе эксплуатации: трещин, коррозии внутренней поверхности и др.

В зависимости от способа получения первичной информации различают радиографический, радиоскопический, радиометрический контроль и метод регистрации вторичных электронов. В соответствии с ГОСТ 18353–79 и ГОСТ 24034–80, эти методы определяются следующим образом.

Под *радиографическим* понимают метод радиационного контроля, основанный на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в радиографический снимок или записи этого изображения на запоминающее устройство с последующим преобразованием в световое изображение. Радиографический снимок представляет собой распределение плотности почернения (или цвета) на рентгеновской пленке и фотопленке, коэффициента отражения света на ксерографическом снимке и т. д., соответствующее радиационному изображению контролируемого объекта. В зависимости от типа используемого детектора различают собственно радиографию — регистрацию теневой проекции объекта на рентгеновскую пленку — и электрорадиографию. Если в качестве детектора используется цветной фотоматериал, т. е. градации радиационного изображения воспроизводятся в виде градации цвета, то говорят о цветовой радиографии.



Под *радиоскопическим* понимают метод радиационного контроля, основанный на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в световое изображение на выходном экране радиационно-оптического преобразователя, причем полученное изображение анализируют в процессе контроля. При использовании в качестве радиационно-оптического преобразователя флюоресцентного экрана или в замкнутой телевизионной системе цветного монитора различают флуороскопию или цветовую радиоскопию. В качестве источников излучения в основном используют рентгеновские аппараты, реже ускорители и радиоактивные источники.

*Радиометрический метод* основан на измерении одного или нескольких параметров ионизирующего излучения после его взаимодействия с контролируемым объектом. В зависимости от вида используемых детекторов ионизирующих излучений различают сцинтилляционный и ионизационный методы радиационного контроля. В качестве источников излучения в основном находят применение радиоактивные источники и ускорители, а в системах толщинометрии используются также рентгеновские аппараты.

Различают также *метод вторичных электронов*, когда регистрируется поток высокоэнергетических вторичных электронов образованного в результате взаимодействия проникающего излучения с контролируемым объектом.

По характеру взаимодействия физических полей с контролируемым объектом различают методы прошедшего излучения, рассеянного излучения, активационного анализа, характеристического излучения, автоэмиссионный. Методами прошедшего излучения являются практически все классические методы рентгено- и гамма-дефектоскопии, а также толщинометрии, когда различными детекторами регистрируется излучение, прошедшее через контролируемый объект, т. е. полезную информацию о контролируемом параметре несет, в частности, степень ослабления интенсивности излучения.

Метод активационного анализа основан на анализе ионизирующего излучения, источником которого является наведенная радиоактивность контролируемого объекта, возникшая в результате воздействия на него первичного ионизирующего излучения. Наведенная активность в анализируемом образце создается нейтронами, фотонами или заряженными частицами. По данным измерения наведенной активности определяют содержание элементов в различных веществах.

В промышленности при поисках и разведке полезных ископаемых находят применение методы нейтронно- и гамма-активационного анализа. При нейтронно-активационном анализе в качестве источников первичного излучения широкое распространение получили радиоактивные источники нейтронов, генераторы нейтронов, подкритические сборки, реже — ядерные реакторы и ускорители заряженных частиц. В гамма-активационном

анализе используются всевозможные ускорители электронов (линейные ускорители, бетатроны, микротроны), позволяющие проводить высокочувствительный элементный анализ образцов горных пород и руд, биологических объектов, продуктов технологической переработки сырья, веществ высокой чистоты, делящихся материалов.

К методам характеристического излучения относятся методы рентгено-радиометрического (адсорбционный и флуоресцентный) анализа. По своей сущности этот метод близок классическому рентгеноспектральному и основан на возбуждении атомов определяемых элементов первичным излучением от радионуклида и последующей регистрации характеристического излучения возбужденных атомов. Рентгенорадиометрический метод в сравнении с рентгеноспектральным имеет более низкую чувствительность. Но благодаря простоте и транспортабельности аппаратуры, возможностям автоматизации технологических процессов и использованию моноэнергетических источников излучения рентгенорадиометрический метод нашел широкое применение при массовом экспресс-анализе технологических или геологических проб. К методу характеристического излучения относят также методы рентгеноспектрального и рентгенорадиометрического измерения толщины покрытий.

Автоэмиссионный метод неразрушающего (радиационного) контроля основан на генерации ионизирующего излучения веществом контролируемого объекта без активации его в процессе контроля. Сущность его заключается в том, что при помощи внешнего электрода с высоким потенциалом (электрическое поле напряженностью порядка  $10^6$  В/см) с металлической поверхности контролируемого объекта можно вызвать автоэлектронную эмиссию, ток которой измеряется. Таким образом можно контролировать качество подготовки поверхности, наличие на ней загрязнений или пленок.

## 12. Современные экспертные системы

---

Современные системы оценки технического состояния (ОТС) высоковольтного электрооборудования станций и подстанций предполагают автоматизированные экспертные системы, направленные на решение двух видов задач: определение фактического функционального состояния оборудования с целью корректировки жизненного цикла оборудования и прогнозирования его остаточного ресурса и решение технико-экономических задач, таких как управление производственными активами сетевых предприятий.

Как правило, среди задач европейских систем ОТС, в отличие от российских, основной целью не является продление срока службы электрооборудования, по причине замены оборудования после окончания его срока службы, определенного заводом изготовителем. Достаточно сильные отличия в нормативной документации по обслуживанию, диагностике, испытаниям и т. д. электрооборудования, составу оборудования и его эксплуатации не позволяют использовать зарубежные системы ОТС для российских энергосистем. В России существует несколько экспертных систем, которые сегодня активно используются на реальных энергообъектах.

### *Современные системы ОТС*

Структура всех современных систем ОТС в общем и целом примерно схожа и состоит из четырех основных составляющих:

- 1) база данных (БД) — исходные данные, на основе которых и выполняется ОТС оборудования;
- 2) база знаний (БЗ) — набор знаний в виде структурированных правил обработки данных, включающих в себя всевозможный опыт экспертов;
- 3) математический аппарат, с помощью которого описывается механизм работы системы ОТС;
- 4) результаты. Обычно раздел «Результаты» состоит из двух подразделов: сами результаты ОТС оборудования (формализованные или не формализованные оценки) и управляющие воздействия на основе полученных оценок — рекомендации о дальнейшей эксплуатации оцениваемого оборудования.

Безусловно, структура систем ОТС может отличаться, но чаще всего архитектура таких систем идентична.

В качестве входных параметров (БД) обычно используются данные, полученные в ходе различных методов неразрушающего контроля, испы-

таний оборудования, или данные, полученные с различных систем мониторинга, датчиков и т. д.

В качестве базы знаний могут использоваться различные правила, как представленные в РД и других нормативных документах, так и в виде сложных математических правил и функциональных зависимостей.

Результаты, как было описано выше, отличаются обычно только «видом» оценок (индексов) состояния оборудования, возможными интерпретациями классификаций дефектов и управляющих воздействий.

Но основным отличием систем ОТС друг от друга является использование разных математических аппаратов (моделей), от которых в большей степени и зависят достоверность и корректность самой системы и ее работа в целом.

На сегодняшний день в российских системах ОТС электрооборудования в зависимости от их назначения применяются различные математические модели — от самых простых моделей на основе обычных правил продукции до более сложных, например на основе метода Байеса, как представлено в источнике [1].

Несмотря на все безусловные достоинства существующих систем ОТС, в современных условиях они имеют ряд существенных недостатков:

- ориентированы на решение конкретной задачи конкретного собственника (под конкретные схемы, конкретное оборудование и т. д.) и, как правило, не могут использоваться на других аналогичных объектах без серьезных переработок;
- используют разномасштабную и разноточную информацию, что может приводить к возможной недостоверности оценки;
- не учитывают динамику изменения критериев ОТС оборудования, другими словами, системы не обучаемы.

Все вышесказанное, на наш взгляд, лишает современные системы ОТС их универсальности, из-за чего сложившаяся ситуация в электроэнергетике России вынуждает совершенствовать существующие или искать новые методы моделирования систем ОТС.

Современные системы ОТС должны обладать свойствами анализа (самоанализа) данных, поиска закономерностей, прогнозирования и, в конечном счете, обучения (самообучения). Такие возможности дают методы искусственного интеллекта. Сегодня использование методов искусственного интеллекта — это не только общепризнанное направление научных исследований, но и вполне успешная реализация фактического применения данных методов для технических объектов различных сфер жизни.

## Заключение

---

Надежность и бесперебойность работы силовых электротехнических комплексов и систем во многом определяются работой элементов, составляющих их, и в первую очередь силовых трансформаторов, обеспечивающих согласование комплекса с системой и преобразование ряда параметров электроэнергии в требуемые величины для дальнейшего ее использования. Одним из перспективных направлений повышения эффективности функционирования электротехнического маслonaполненного оборудования является совершенствование системы технического обслуживания и ремонтов электрооборудования. В настоящее время кардинальным путем снижения объемов и стоимости технического обслуживания электрооборудования, численности обслуживающего и ремонтного персонала осуществляется переход от предупредительного принципа, жесткой регламентации ремонтного цикла и периодичности проведения ремонтов к обслуживанию на основе нормативов планово-предупредительных ремонтов. Разработана концепция эксплуатации электротехнического оборудования по техническому состоянию путем более глубокого подхода к назначению периодичности и объемов технических обслуживании и ремонтов по результатам диагностических обследований и мониторинга электротехнического оборудования в целом и маслonaполненного трансформаторного оборудования в частности как неотъемлемого элемента любой электротехнической системы.

При переходе к системе ремонтов по техническому состоянию качественно изменяются требования к системе диагностирования электрооборудования, при которой главной задачей диагностирования становится прогноз технического состояния на относительно длительный период. Решение такой задачи не является тривиальным и возможно только при комплексном подходе к совершенствованию методов, средств, алгоритмов и организационно-технических форм диагностирования.

Анализ опыта применения автоматизированных систем мониторинга и диагностики в России и за рубежом позволил сформулировать ряд задач, которые должны быть решены для получения максимального эффекта при внедрении систем online-мониторинга и диагностики на объектах:

1. Оснащение подстанций средствами непрерывного контроля (мониторинга) и диагностики состояния основного оборудования следует проводить комплексно, создавая единые проекты автоматизации подстанций,

.....

в которых вопросы управления, регулирования, защиты и диагностики состояния оборудования будут решаться взаимосвязано.

2. При выборе номенклатуры и количества непрерывно контролируемых параметров основным критерием должно быть обеспечение приемлемого уровня риска эксплуатации каждого конкретного аппарата. В соответствии с этим критерием наиболее полным контролем в первую очередь должно охватываться оборудование, работающее за пределами нормативного срока службы. Затраты на оснащение средствами непрерывного контроля оборудования, выработавшего нормированный срок службы, должны быть выше, чем нового оборудования с более высокими показателями надежности.

3. Необходима разработка принципов технически и экономически обоснованного распределения задач между отдельными подсистемами АСУ ТП. Для успешного решения задачи создания полностью автоматизированных подстанций для всех видов оборудования должны быть разработаны критерии, представляющие собой формализованные физико-математические описания исправного, дефектного, аварийного и других состояний аппаратов как функции результатов мониторинга параметров их функциональных подсистем.

## Список библиографических ссылок

---

1. Боков Г. С. Техническое перевооружение российских электрических сетей // Новости электротехники. 2002. № 2 (14). С. 10–14.
2. Вавилов В. П., Александров А. Н. Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве и энергетике. М. : НТФ «Энергопресс», 2003. С. 360.
3. Яшура А. И. Система технического обслуживания и ремонта общепромышленного оборудования : справочник. М. : Энас, 2012.
4. Биргер И. А. Техническая диагностика. М. : Машиностроение, 1978. С. 240.
5. Вдовико В. П. Методология системы диагностики электрооборудования высокого напряжения // Электричество. 2010. № 2. С. 14–20.
6. Чичев С. И., Калинин В. Ф., Глинкин Е. И. Система контроля и управления электротехническим оборудованием подстанций. М. : Спектр, 2011. С. 139.
7. Барков А. В. Основа для перевода вращающегося оборудования на обслуживание и ремонт по фактическому состоянию [Электронный ресурс] // Вибродиагностические системы Ассоциации ВАСТ. URL: <http://www.vibrotek.ru/russian/biblioteka/book22> (дата обращения: 20.03.2015). Загл. с экрана.
8. Захаров О. Г. Поиск дефектов в релейно-контакторных схемах. М. : НТФ «Энергопресс», «Энергетик», 2010. С. 96.
9. Сви П. М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. М. : Энергоатомиздат, 1992. С. 240.
10. Хренников А. Ю., Сидоренко М. Г. Тепловизионное обследование электрооборудования подстанций и промышленных предприятий и его экономическая эффективность // Рынок Электротехники. № 2 (14). 2009. С. 96–100.
11. Сидоренко М. Г. Тепловизионная диагностика как современное средство мониторинга [Электронный ресурс]. URL: <http://www.centert.ru/articles/22/> (дата обращения: 20.03.2015). Загл. с экрана.

## Оглавление

---

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ .....	4
2. КОНЦЕПЦИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИАГНОСТИКИ .....	8
3. ДЕФЕКТЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ .....	11
4. ТЕПЛОВЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ.....	14
4.1. Тепловые методы контроля: основные термины и назначение .....	14
4.2. Основные приборы для обследования оборудования ТМК.....	15
5. ДИАГНОСТИКА МАСЛОПОЛНЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ .....	20
6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ .....	29
7. ВИБРОДИАГНОСТИКА .....	33
8. МАГНИТНАЯ СТРУКТУРОСКОПИЯ .....	41
9. АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ .....	44
10. АКУСТИКО-ЭМИССИОННАЯ ДИАГНОСТИКА .....	52
11. РАДИАЦИОННЫЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ.....	54
12. СОВРЕМЕННЫЕ ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ.....	58
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	60
СПИСОК БИБЛИОГРАФИЧЕСКИХ ССЫЛОК.....	62



*Учебное издание*

**Хальясмаа** Александра Ильмаровна  
**Дмитриев** Степан Александрович  
**Кокин** Сергей Евгеньевич  
**Глушков** Даниил Александрович

**ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ**

Редактор *В. О. Корионова*  
Верстка *Е. В. Суховой*

Подписано в печать 13.07.2015. Формат 70×100 1/16.  
Бумага писчая. Плоская печать. Усл. печ. л. 5,16.  
Уч.-изд. л. 4,3. Тираж 200 экз. Заказ 206.

Издательство Уральского университета  
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ  
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5  
Тел.: 8 (343) 375–48–25, 375–46–85, 374–19–41  
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ  
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4  
Тел.: 8 (343) 350–56–64, 350–90–13  
Факс: 8 (343) 358–93–06  
E-mail: press-urfu@mail.ru

